

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/FR05/000752

International filing date: 29 March 2005 (29.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: FR  
Number: 0403143  
Filing date: 26 March 2004 (26.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 13 June 2005 (13.06.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse



# BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

## COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le

22 AVR. 2005

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

SIEGE  
26 bis, rue de Saint-Petersbourg  
75800 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
www.inpi.fr





26 bis, rue de Saint Pétersbourg - 75800 Paris Cedex 08

Pour vous informer : INPI DIRECT

**0 825 83 85 87**

0,15 € TTC/min

Télécopie : 33 (0)1 53 04 52 65

Réserve à l'INPI

1er dépôt

# BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354\*04

## REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

page 1/2

BR1

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 @ W / 191203

<b>REMISE DES PIÈCES</b> DATE <b>26 MARS 2004</b> LIEU <b>75 INPI PARIS 34 SP</b> N° D'ENREGISTREMENT <b>0403143</b> NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE <b>26 MARS 2004</b> PAR L'INPI		<b>NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE  Cabinet REGIMBEAU 20, rue de Chazelles 75847 PARIS CEDEX 17 FRANCE	
<b>Vos références pour ce dossier</b> (facultatif) <b>240897 D21618 AV</b>			
<b>Confirmation d'un dépôt par télécopie</b>		<input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie	
<b>2 NATURE DE LA DEMANDE</b>		<b>Cochez l'une des 4 cases suivantes</b>	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
<i>Demande de brevet initiale</i>		N°	Date
<i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i>		N°	Date
Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i>		N°	Date
<b>3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)</b>			
APPARIEMENT FIN D'IMAGES STEREOSCOPIQUES ET INSTRUMENT DEDIE AVEC UN FAIBLE COEFFICIENT STEREOSCOPIQUE.			
<b>4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ</b> <b>OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE</b> <b>LA DATE DE DÉPÔT D'UNE</b> <b>DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE</b>		Pays ou organisation Date Pays ou organisation Date Pays ou organisation Date <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
<b>5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)</b>		<input checked="" type="checkbox"/> <b>Personne morale</b> <input type="checkbox"/> <b>Personne physique</b>	
Nom ou dénomination sociale Prénoms Forme juridique N° SIREN Code APE-NAF Domicile ou siège Nationalité N° de téléphone (facultatif) Adresse électronique (facultatif)		CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES  775665912  2, place Maurice Quentin 75001 PARIS FRANCE  FRANCE Française  N° de télécopie (facultatif)	
		<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	

Remplir impérativement la 2<sup>ème</sup> page

Réservé à l'INPI

REMISE DES PIÈCES

DATE

**26 MARS 2004**

LIEU

**75 INPI PARIS 34 SP**

N° D'ENREGISTREMENT

**0403143**

NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI

DB 540 W / 191203

<b>6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)</b> Nom Prénom Cabinet ou Société Nationalité N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel Adresse Rue Code postal et ville Pays N° de téléphone (facultatif) N° de télécopie (facultatif) Adresse électronique (facultatif)		240897 D21618AV Cabinet REGIMBEAU 20, rue de Chazelles 75847 PARIS CEDEX 17 01 44 29 35 00 01 44 29 35 99 info@regimbeau.fr
<b>7 INVENTEUR (S)</b> Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)
<b>8 RAPPORT DE RECHERCHE</b> Établissement immédiat ou établissement différé		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation) <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Choix à faire obligatoirement au dépôt (cf. Notice explicative Rubrique 8)
<b>9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG
<b>10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS</b> Le support électronique de données est joint La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe		<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes		
<b>11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> (Nom et qualité du signataire)		<b>VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI</b>

APPARIEMENT FIN D'IMAGES STEREOSCOPIQUES ET INSTRUMENT  
DEDIE AVEC UN FAIBLE COEFFICIENT STEREOSCOPIQUE

La présente invention concerne le domaine de la stéréoscopie. En particulier, l'invention concerne un procédé et un ensemble d'acquisition et d'appariement fin d'un couple stéréoscopique d'images.

C'est-à-dire que l'invention concerne un procédé et un système permettant l'acquisition et la mise en correspondance des points d'une première image avec les points d'une deuxième image formant un couple stéréoscopique d'images.

PRESENTATION GENERALE DE L'ART ANTERIEUR

La stéréoscopie est un procédé donnant l'impression de relief à partir d'un couple d'images 2D (ou deux dimensions) représentant une scène ayant été acquise avec des points de vue différents.

Tel qu'illustré à la figure 3, deux images formant un couple stéréoscopique d'images sont acquises à l'aide de deux capteurs CCD (Charge Couple Device) (matrices ou barrettes) 15, 16 situés dans le même plan focal 19' et symétriques par rapport à la droite A-A' passant par le centre de la scène observée et perpendiculaire au plan focal 19'.

Ces capteurs CCD vont permettre l'acquisition de deux images de la scène observée située à une certaine distance 18 des capteurs CCD.

Du fait de l'écartement 19 des deux capteurs CCD qui les ont acquises, ces deux images ne sont pas sans relation. Ainsi, une scène verra ses images décalées d'une image du couple à l'autre. Ce décalage est appelé disparité.

Le système stéréoscopique le plus élaboré à l'heure actuelle est le système visuel humain. L'homme dispose de deux yeux situés dans le même plan focal comprenant chacun un cristallin (système optique) et une rétine

(capteur CCD). Ces yeux lui permettent de percevoir son environnement de deux points de vue légèrement différents. La fusion mentale de ces deux vues lui permet d'engendrer une image spatiale (3D) de son environnement.

Les méthodes de traitement d'images stéréoscopiques essaient, par des calculs mathématiques, de modéliser ce que notre cerveau fait sans difficulté. Le principe consiste dans un premier temps à mettre en correspondance les points des images du couple stéréoscopique d'images. Dans un deuxième temps, on reconstruit les coordonnées 3D des points de la scène observée en calculant l'intersection des droites passant par les points appariés et par les centres optiques des capteurs CCD.

La principale difficulté rencontrée lors de la mise en place d'une telle méthode est justement de mettre un à un en correspondance les points des images du couple. En effet, les deux images du couple n'étant pas prises sous la même incidence, un point donné de la scène dont la position dans la première image est donnée par les coordonnées  $(X1, Y1)$ , aura pour coordonnées  $(X2, Y2)$  dans la deuxième image, avec  $X1 \neq X2$  et  $Y1 \neq Y2$ .

Cet écart de position entre les projections sur les capteurs CCD d'un point donné de la scène observée dont les deux images se forment sur des points géométriquement non correspondants est appelé disparité géométrique. Dans la suite, le terme « d'écarts de position » sera préféré au terme « disparité » bien qu'ils aient tous deux la même signification.

Il a déjà été proposé un certain nombre de méthodes permettant l'appariement des points de 2 images prises sous 2 angles différents. Ces méthodes utilisent souvent le principe de corrélation pour faire correspondre les points d'une image à l'autre et donc déterminer les écarts de position.

Le principe de la corrélation est fondé sur la mesure d'une ressemblance locale entre deux images. Cette ressemblance locale s'effectue en introduisant des fenêtres pondérées centrées sur les voisinages homologues au sens du

positionnement géométrique dans l'image. Ces fenêtres pondérées sont appelées fenêtres de corrélation.

Comme présenté sur la figure 1, le procédé consiste à se donner une fenêtre 3 de corrélation centrée sur le point 40 étudié de la première image 1, et à rechercher son homologue 41 au sens radiométrique sur la deuxième image 2. Cette opération est réalisée par déplacement de la fenêtre 3 de corrélation dans une fenêtre plus importante appelée aire de recherche 4. L'aire de recherche 4 est centrée sur l'homologue géométrique estimé 42 du point courant 40 de la première image. Le tableau des valeurs de corrélation obtenues constitue la nappe de corrélation. On retient alors l'écart de position pour lequel la valeur de corrélation est maximale.

Lorsque l'on effectue l'appariement des points d'un couple stéréoscopique d'images par corrélation, la première image sert de référence, et l'on cherche à retrouver, pour chaque point de la première image, son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Cette opération est réalisée successivement sur un sous ensemble ou sur tous les points de la première image, et le point de la première image étudié à un instant donné sera dans la suite appelé point courant. Chaque point de la première image peut être considéré comme un signal que l'on cherche à retrouver dans la deuxième image par corrélation. Un point 40 de la première image et un point 41 de la deuxième image sont des homologues radiométriques s'ils correspondent au même point de la scène représentée dans les images du couple stéréoscopique.

A partir de deux images 2D formant un couple stéréoscopique d'images il est possible, une fois les points des deux images du couple appariés, de déterminer la coordonnée en Z d'un point de la scène ayant pour coordonnées  $(X_1, Y_1)$  dans la première image, et  $(X_2, Y_2)$  dans la deuxième image du couple.



En l'absence de perturbations (microvibrations par exemple) la précision sur la détermination de la troisième coordonnée d'un point de la scène aussi connue sous le nom de précision altimétrique est proche de :

$$dz = d\varepsilon / (b / h),$$

où

- $d\varepsilon$  est la précision 17 de la restitution de la disparité, et
- $b/h$  est le coefficient stéréoscopique avec
- $b$  est la distance 19 entre les deux capteurs CCD situés dans le même plan focal, et
- $h$  la distance 18 entre les capteurs CCD et la scène visée.

Les méthodes qui utilisent le principe de corrélation pour apparier chaque point de la première image avec son homologue radiométrique dans la deuxième image ne permettent pas d'obtenir une bonne précision sur la restitution de la disparité ( $d\varepsilon$ ). En effet, le défaut majeur du procédé de corrélation est un phénomène dit d'adhérence aux zones les plus singulières des images du couple stéréoscopique, comme par exemple les contours. Le phénomène d'adhérence est causé notamment par la taille de la fenêtre de corrélation utilisée pour appareiller les points du couple d'images.

Ce phénomène d'adhérence est mis en évidence à la figure 2 sur un décalage 6 sinusoïdal de révolution de période 35 et d'amplitude +/- 0.5, la mesure 7 de ce décalage 6 par corrélation avec une fenêtre de corrélation de taille 15x15 de type prolate et la première image 9. La mesure 7 de ce décalage par corrélation fait apparaître le défaut majeur de la corrélation au niveau des contours 9, 10, 11, 12, 13, de l'image 7.

Par conséquent, l'utilisation du principe de corrélation pour déterminer les écarts de position entre les points de deux images stéréoscopiques nécessite d'avoir un fort coefficient stéréoscopique afin de diminuer linéairement l'erreur altimétrique, ou erreur dans la détermination de la troisième coordonnée Z d'un

point de la scène représentée dans le couple d'images. Inversement les faibles coefficients stéréoscopiques augmentent linéairement l'erreur altimétrique.

Un des buts de la présente invention est de fournir une méthode d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images ne présentant pas les inconvénients de la méthode précédemment décrite, et ainsi permettre la mise en place d'une méthode permettant l'appariement précis des points d'un couple stéréoscopique d'images pour de faibles coefficients stéréoscopiques.

Cet appariement des points d'un couple stéréoscopique d'images est réalisé par l'élaboration de cartes des écarts de position, chaque point de ces cartes représentant l'écart de position entre un point de la première image et son homologue dans la deuxième image.

Comme il a été précédemment mentionné, les méthodes d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images basées sur le principe de corrélation ne permettent d'obtenir un appariement précis des points que pour un fort coefficient stéréoscopique.

Le coefficient stéréoscopique ( $b/h$ ) est le rapport entre l'écartement 19 entre les deux capteurs CCD 15, 16 situés dans le même plan focal 19' (cf. figure 3), et la distance 18 entre les capteurs CCD et la scène visée.

La distance 18 entre les capteurs CCD et la scène observée dépend de l'application. Ainsi, suivant l'application, l'écartement 19 entre les capteurs CCD 15, 16 doit être prévu suffisant pour avoir un fort coefficient stéréoscopique.

Les systèmes d'acquisition et d'appariement de couple stéréoscopique d'images comprennent un système d'acquisition et un système de traitement. Ces deux systèmes sont en général distants et communiquent par des moyens de communication avec ou sans fil.

Les systèmes de traitement permettent l'appariement d'un couple stéréoscopique d'images. Ces systèmes mettent en œuvre les méthodes d'appariement d'un couple stéréoscopique. Dans le cas d'un système de traitement mettant en œuvre une méthode basée sur le principe de corrélation, il

est donc nécessaire d'avoir un fort coefficient stéréoscopique pour un appariement précis des images d'un couple.

Les systèmes d'acquisition de couple stéréoscopique d'images fournissant aux systèmes de traitement les images à traiter doivent donc être conçus de sorte qu'ils respectent cette condition (coefficient stéréoscopique fort du couple d'images).

Dans le cas d'un système spatial d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images, la distance 18 entre le système d'acquisition et la scène observée est très grande.

Par conséquent, l'écartement 19 entre les capteurs CCD du système d'acquisition doit être très important pour avoir un fort coefficient stéréoscopique. L'importance de cet écartement implique que les systèmes spatiaux d'acquisition de couple stéréoscopique d'images comprennent deux instruments optiques 15', 16' (satellite) comprenant chacun un capteur CCD 15, 16.

La présence, dans les systèmes spatiaux d'acquisition, de deux instruments optiques 15', 16' comprenant chacun un capteur CCD 15, 16 induit une plus grande complexité dans l'appariement d'image, et un coût plus important pour la conception et la mise sur orbite de tels systèmes spatiaux d'acquisition.

En vision de près (appareils photos par exemple), l'acquisition d'images stéréoscopiques nécessite la présence de deux systèmes optiques dans le système d'acquisition.

Un autre but de la présente invention est de fournir un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images comprenant un système d'acquisition simplifié permettant l'acquisition d'un couple pour un faible coefficient stéréoscopique et un système de traitement mettant en œuvre la méthode d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images selon la présente invention.

## PRESENTATION DE L'INVENTION

L'invention concerne un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images comprenant un système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images et un système de traitement du couple stéréoscopique acquis, caractérisé en ce que le système d'acquisition du couple stéréoscopique comporte un instrument d'acquisition unique comprenant deux capteurs CCD dans le plan focal optique, chaque capteur CCD permettant l'acquisition d'une image du couple stéréoscopique d'images.

Des aspects préférés, mais non limitatifs de l'ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images selon l'invention sont les suivants :

- chaque capteur CCD est une barrette CCD ;
- chaque capteur CCD est une matrice CCD ;
- le système de traitement comporte :
  - des moyens aptes à traiter les deux images du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, lesdits moyens de traitement comprenant des moyens qui, pour chaque changement de niveau de résolution, sont aptes à :
    - déterminer, en chaque point de la première image, une fenêtre de corrélation optimale,
    - calculer, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- obtenir, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,
- effectuer un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue.

5

- des moyens aptes à obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image ;

- les moyens aptes à traiter les deux images du couple comprennent en outre :

10

- des moyens aptes à effectuer une convolution des images du couple par une fenêtre de convolution,
- des moyens aptes à effectuer un zoom de taille 2 des images du couple stéréoscopique ;

15

- les moyens aptes à déterminer la fenêtre de corrélation optimale en chaque point de la première image comprennent :

- des moyens aptes à calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation,

- des moyens aptes à calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation,

20

- des moyens aptes à calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNR<sub>c</sub>) des courbures précédentes,

et des moyens aptes à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à un paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.

25

- les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre des moyens aptes à effectuer une interpolation de la deuxième image grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.

- les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre :
  - des moyens aptes à rejeter les points homologues issus de fenêtres de corrélation plus grandes et contenant des fenêtres de corrélation plus petites.
  - 5       - des moyens aptes à rejeter les points homologues de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image.
  - des moyens aptes à compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants.
  - 10       - des moyens aptes à lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution.
  - des moyens aptes à composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.
  - 15       - les moyens aptes à rejeter les points homologues vérifiant une condition de rejet comprennent :
    - 20       - des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer sur la première image les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
    - des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image,
    - 25       - des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer, dans la deuxième image, son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,

- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image.

L'invention concerne également un procédé d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images, caractérisé en ce qu'il comprend l'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images par un instrument d'acquisition unique comprenant deux capteurs CCD situés dans le plan focal optique, le premier capteur permettant l'acquisition d'une première image du couple, et le deuxième capteur permettant l'acquisition d'une deuxième image du couple.

Des aspect préférés mais non limitatifs du procédé selon la présente invention sont les suivant :

- le procédé comporte en outre les phases consistant à :
  - traiter grâce à des moyens de traitement les deux images du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, en, pour chaque changement de niveau de résolution :
    - déterminant, en chaque point de la première image, une fenêtre de corrélation optimale,
    - calculant, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,
    - obtenant, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image,

- effectuant un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue.

- obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image et son homologue radiométrique dans la deuxième image ;

- le procédé comporte une phase consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire ;

- le procédé comporte une phase consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire et une direction orthogonale à la direction épipolaire ;

- le procédé comprend en outre une phase de saisie par un utilisateur d'au moins un paramètre d'exhaustivité correspondant au choix d'un rapport signal sur bruit de corrélation suivant chaque direction de traitement ;

- le procédé comporte en outre une phase d'acquisition de données comprenant l'acquisition :

- d'une image de bruit par chaque capteur CCD,

- du type de la fenêtre de corrélation,

- d'une direction épipolaire pour chaque image du couple pour un coefficient stéréoscopique moyen,

- d'au moins une valeur de l'écart de position maximum suivant chaque direction de traitement ;

- le procédé comprend en outre une phase de prétraitement des données consistant à :

- calculer un nombre de niveaux de résolution suivant chaque direction de traitement en fonction de chaque valeur de l'écart de position maximum,

- filtrer les images du couple stéréoscopique d'images par convolution avec une fenêtre de convolution,



- filtrer l'image de bruit par convolution avec ladite fenêtre de convolution,
- interpoler dans une géométrie épipolaire le couple stéréoscopique d'images ;
- la phase de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :
  - effectuer une convolution des images du couple par une fenêtre de convolution,
  - effectuer un zoom de taille 2 des images du couple stéréoscopique ;
- l'étape de détermination de la fenêtre de corrélation optimale consiste à, pour chaque point de la première image :
  - calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation,
  - calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation,
  - calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNR<sub>c</sub>) des courbures précédentes,et à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à chaque paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.
- la phase de traitement des images comprend en outre une étape consistant à effectuer une interpolation de la deuxième image grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.
- la phase de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :
  - rejeter les points homologues issus de fenêtres de corrélation plus grandes et contenant des fenêtres de corrélation plus petites.
  - rejeter les points homologues de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image.

- compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants.
- lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution.
- composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.
- l'étape de rejet des points homologues vérifiant une condition de rejet consiste à, pour le point courant :
  - calculer sur la première image les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
  - calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image,
  - calculer, dans la deuxième image, son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,
  - calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,
  - rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image.
- la phase d'obtention, pour le niveau de résolution le plus fin, de la carte des écarts de position, comprend l'obtention :
  - d'au moins un tableau représentant la carte des écarts de position suivant chaque direction de traitement,
  - d'au moins un tableau représentant une carte des tailles des fenêtres de corrélation employées en tout point non rejeté de la première image, suivant chaque direction de traitement.
- les fenêtres de convolution et de corrélation utilisées sont des fenêtres de convolution et de corrélation de type prolate.

## PRESENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative et doit être lue en regard des dessins annexés, sur lesquels :

- La figure 1 illustre une scène représentée dans un couple stéréoscopique d'images;
- La figure 2 illustre une vue d'une scène de la composante en colonnes, d'un décalage sinusoïdal injecté, et du résultat de la mesure de ce décalage par corrélation ;
- La figure 3 illustre une vue en perspective d'un système de stéréoscopie ;
- La figure 4 illustre un graphique représentant le taux de corrélation suivant une direction d'une image de type SPOT5 en fonction de l'écart de position entre le point courant de la première image et le point courant de la deuxième image, le point courant correspondant dans chaque image au point corrélé ou point au centre de la fenêtre SPOT5 (cf. p 23) ;
- La figure 5 illustre un graphique représentant le taux de corrélation d'une fenêtre de type hypomode carré 2X2 en fonction de l'écart de position entre le point courant de la première image et le point courant de la deuxième image, le point courant correspondant dans chaque image au point corrélé ou point au centre de la fenêtre ;
- La figure 6 illustre un graphique représentant le taux de corrélation d'une fenêtre de type prolate en fonction de l'écart de position entre le point courant de la première image et le point courant de la deuxième image, le point courant correspondant dans chaque image au point corrélé ou point au centre de la fenêtre ;
- La figure 7 illustre une vue d'une scène, des points de la scène conservés après application d'un critère en ligne, des points de la scène

conservés après application d'un critère en colonne, et des points de la scène conservés après application d'un critère en ligne et en colonne ;

- La figure 8 est un graphique de la variation de la précision altimétrique en fonction du coefficient stéréoscopique pour quatre méthodes différentes d'appariement d'images stéréoscopiques (fenêtres créneaux, prolates, prolates + correction barycentrique) ;
- La figure 9 illustre une vue d'un instrument dédié à la stéréoscopie ;
- La figure 10 illustre une vue en perspective de deux images formant un couple stéréoscopique d'images et de la scène observée ;
- La figure 11 illustre une vue d'un couple d'images présentant chacune trois réponses impulsionnelles ou fonction de transfert de modulation (FTM).

#### DESCRIPTION D'UN MODE DE REALISATION DE L'INVENTION

La méthode d'appariement fin d'images stéréoscopiques selon la présente invention va maintenant être détaillée en référence aux figures 1 à 12. Les éléments équivalents représentés dans les différentes figures porteront les mêmes références numériques.

Le procédé ci-présenté permet le calcul de cartes précises des écarts de position entre images de couples stéréoscopiques ayant des coefficients stéréoscopiques faibles avec la même précision altimétrique que pour des coefficients stéréoscopiques forts. Ce procédé fonctionne jusqu'à des coefficients stéréoscopiques très faibles (0.01) sans dégrader la précision altimétrique.

Cette configuration stéréoscopique d'acquisition (b/h faible) présente l'avantage de limiter les parties cachées, c'est-à-dire des parties n'apparaissant que dans l'une des deux images, et par exemple de voir le fond des rues en ville. En effet, comme l'illustre la figure 3, les parties cachées 14, sont liées à

l'acquisition par un capteur CCD 15 ou 16 d'une prise de vue oblique 2D d'un objet 3D. Aussi, l'acquisition sous coefficient stéréoscopique faible permet une mise en œuvre plus automatique de la réalisation des cartes des écarts de position entre couples d'images en évitant la gestion, toujours laborieuse, des parties cachées.

Les différentes étapes ayant conduit à la détermination du procédé et du système vont maintenant être présentées.

Les modèles utilisés en traitement d'image sont des modèles discrets. Cependant, il est souvent plus facile de commencer par raisonner sur un modèle continu, et de passer ensuite au cas discret. C'est cette approche qui est utilisée dans la suite pour décrire la méthode d'appariement d'image.

#### 1. Modélisation continue de la corrélation unidirectionnelle

La détermination du modèle continu de la corrélation unidirectionnelle va conduire à l'obtention d'une équation permettant de relier la mesure de l'écart de position effectuée par l'opération de corrélation suivant une direction de traitement en fonction de la valeur réelle de l'écart de position. Cette équation mettra en évidence le défaut précédemment indiqué de la corrélation, dit "adhérence". Un traitement permettant de limiter ce phénomène d'adhérence sera ensuite présenté. Enfin, une seconde relation, à savoir une condition morphologique directionnelle locale dont dépend la précision de l'écart de position mesuré sera également obtenue à l'issue de la modélisation continue de la corrélation unidirectionnelle.

Dans cette partie, il est fait l'hypothèse d'une direction unique des cartes des écarts de position, par exemple suivant des droites dites épipolaires, et dont une définition va maintenant être donnée. Comme illustré à la figure 10, dans un couple stéréoscopique, on définit l'ensemble des plans épipolaires comme étant l'ensemble des plans passant par les deux centres optiques C1 et C2.

Les points P, P1 et P2 font respectivement partis de la scène 38, de la première image 36, et de la deuxième image 37 du couple stéréoscopique. Il apparaît que pour tous les points de la scène 38, le point P et ses points images P1 et P2 appartiennent au même plan épipolaire 35. Les droites intersection des plans images 36 et 37 avec le plan épipolaire 35 sont les droites épipolaires. Celles-ci sont connues puisque les positions des capteurs CCD C1 et C2 sont connues.

La formulation continue du coefficient de corrélation non linéaire est effectuée dans le cas de couple stéréoscopique d'images faiblement bruitées. Le coefficient de corrélation suivant la direction du vecteur unité  $\vec{v}$  dans un voisinage centré en  $\{t\}$  est :

$$\rho_t(\Delta t) = \frac{\int \varphi_t(x) \cdot I(x) \cdot \tilde{I}(x + \Delta t) dx}{\sqrt{\int \varphi_t(x) I^2(x) dx \int \varphi_t(x) \tilde{I}^2(x + \Delta t) dx}} = \frac{(\varphi_t \cdot I) * \tilde{I}(\Delta t)}{\|I\|_{\varphi_t} \|\tilde{I}(\Delta t)\|_{\varphi_t}}$$

(  $*$  est l'opérateur de corrélation,  $I$  est l'image de référence,  $\tilde{I}$  est l'image à apparier et  $\varphi$  la fenêtre ).

On cherche l'écart de position vectoriel  $\Delta t$  qui maximise ce coefficient de corrélation. En effet, l'écart de position pour lequel la corrélation est maximale correspond à l'écart de position entre les coordonnées d'un point de la première image, et les coordonnées de son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Soit  $u(t)$  la fonction vectorielle qui à tout point  $t$  de l'image associe  $\Delta t$ . Ce coefficient de corrélation est calculé à partir d'un rapport, il est donc non linéaire. Les écarts de position étant des différences de positions locales relatives, la recherche de l'écart de position maximisant le coefficient de corrélation peut être ramenée à une recherche autour du point  $t_0=0$ .

On obtient :

$$\rho_0(u_0) = \frac{\int \varphi \cdot I \cdot \tilde{I}(x+u_0) dx}{\sqrt{\int \varphi \cdot I^2(x) dx \int \varphi \cdot \tilde{I}^2(x+u_0) dx}}$$

où  $\|I\|_{\varphi_0}$  est une constante et  $u_0 = u(0) = \Delta t$ ,  $I$  est l'image de référence,  $\tilde{I}$  est l'image à apparier et  $\varphi$  la fenêtre .

5

L'objectif est de rechercher  $u_0$  tel que ce coefficient de corrélation soit maximum. La formule  $\tilde{I}(x) = I(x + \varepsilon(x))$  permet le passage d'une image du couple stéréoscopique à l'autre par un « petit » déplacement de pixels (on donnera un sens particulier au terme « petit » par la suite). Un pixel est l'élément le plus petit d'une image auquel on puisse associer individuellement un niveau de gris représentatif d'une intensité.

10

En effectuant un développement limité au deuxième ordre, suivant la direction du vecteur unitaire  $\vec{v}$  centré en  $\{0\}$  et après remplacement de  $\tilde{I}$  par sa valeur approchée en fonction de  $I$ , le coefficient de corrélation devient :

15

$$\rho_v(u_0) = 1 - \frac{\varphi_0 * [I'(x) \cdot (\varepsilon_v(x) + u_0)]^2}{2\|I\|_{\varphi_0}^2} + \frac{\varphi_0 * [I(x)I'(x) \cdot (\varepsilon(x) + u_0)]^2}{2\|I\|_{\varphi_0}^4}$$

ou  $I'$  est la dérivée de  $I$  suivant  $\vec{v}$ .

#### Equation reliant la mesure de l'écart de position à sa valeur réelle

20

La recherche du maximum du coefficient de corrélation précédent conduit à rechercher l'annulation dans une direction quelconque de traitement de la dérivée de ce coefficient.

Soit  $u$  la mesure de la valeur de l'écart de position suivant la direction  $\vec{v}$  au point  $t$  correspondant au maximum du coefficient de corrélation ( $\rho'=0$ ) et soit  $\varepsilon$  l'écart de position réel suivant cette même direction.

L'équation fondamentale de la corrélation non linéaire est alors

$$u \cdot C = \varphi * [\varepsilon \cdot d(I, I')]$$

où  $C = -\varphi * d$  est la courbure de corrélation suivant la direction  $\vec{v}$ , avec  $\varphi$  la fenêtre de corrélation et  $d(I, I') = \frac{I'^2 - II' A(t)}{\|I\|_{\varphi_t}^2}$  est la quasi-densité de corrélation

et  $A(t) = \frac{[\varphi * II']}{\|I\|_{\varphi_t}^2}$ . Elle ne dépend que de l'image de référence  $I$  et de sa dérivée.

Toutes les dérivées sont exprimées dans la direction de traitement  $\vec{v}$ .

Cette relation fondamentale de la corrélation permet de relier la mesure de l'écart de position effectué par l'opération de corrélation à la valeur réelle de l'écart de position, et ce sans passer par le calcul explicite de la corrélation, calcul toujours très coûteux en temps.

On remarque, en observant la formule permettant d'obtenir la quasi-densité de corrélation, que celle-ci est principalement fonction de  $I'^2$ . Cette quasi-densité de corrélation est donc très sensible aux contours, et plus généralement aux singularités (points où certaines quantités deviennent infinies). Pour pallier le problème d'adhérence suscité, on utilise une méthode dite de recalage barycentrique permettant de revenir à l'écart de position vrai. Cette méthode va maintenant être décrite.

#### Méthode de recalage barycentrique



La méthode dite de recalage barycentrique prend sa source dans la constatation suivante. L'équation fondamentale au point de coordonnée, par exemple 0, devient si l'image a une quasi-densité concentrée en  $\{x_0'\}$ ,

$$\varepsilon(x_0') \approx -u(0)$$

Ceci signifie que la mesure au point 0 est égale à l'écart de position vrai au point  $\{x_0'\}$  (au signe près). Il s'agit précisément du phénomène d'adhérence cité plus haut. Le phénomène d'adhérence de l'image affecte au point courant l'écart de position vrai issu majoritairement d'un autre point plus singulier. La méthode de recalage barycentrique va donc consister à rechercher la position la « plus singulière », et à lui affecter la valeur de l'écart de position mesurée.

La fenêtre de corrélation  $\varphi$  est positive et l'on se place en 0. On recherche le barycentre sur le support de  $\varphi$  dont la quasi-densité est  $\varphi(x)d(x)$ . Il s'agit de la position :

$$\overrightarrow{OG} = \frac{\int \overrightarrow{OP}(x) \varphi(x) d(x) dx}{\int \varphi(x) d(x) dx}$$

où le vecteur  $\overrightarrow{OP}$  décrit le support de  $\varphi$ . Si la masse est concentrée autour du centre de gravité alors l'intégrale se restreint au voisinage du centre de gravité  $V(\overrightarrow{OG})$ . De plus, l'écart de position peut être considéré comme constant dans ce petit voisinage.

D'où

$$\int \varepsilon(x) \varphi(x) d(x) dx \approx \int_{V(G)} \varepsilon(x) \varphi(x) d(x) dx \approx \varepsilon(x) C$$

Donc

$$\varepsilon(\overrightarrow{OG}) \approx -u(0)$$

Tous les termes de la relation précédente sont connus et donc calculables. Il suffit d'affecter la valeur mesurée du décalage  $u(0)$  au point de coordonnées  $G$ .

Une relation permettant de relier la mesure de l'écart de position effectuée par l'opération de corrélation à la valeur réelle de l'écart de position ainsi qu'un traitement permettant de palier au problème d'adhérence de la corrélation viennent donc d'être présentés. Comme indiqué dans la présentation du modèle, une seconde relation, à savoir une condition morphologique directionnelle locale va maintenant être déterminée.

#### Condition morphologique directionnelle locale

La recherche du maximum de la surface de corrélation permet de retrouver à partir d'un point de la première image son homologue radiométrique dans la deuxième image.

Cette recherche du maximum implique que la dérivée seconde du coefficient de corrélation soit strictement négative afin qu'il n'y ait pas plusieurs maximums à la surface de corrélation. En effet, la présence de plusieurs maximums à la nappe de corrélation rendrait ambiguë la détermination du point homologue.

L'expression de cette dérivée seconde suivant la direction  $\vec{v}$  est appelée relation morphologique.

$$\rho''=C$$

$\rho''=C$  est appelé courbure de corrélation suivant la direction  $\vec{v}$ . La courbure doit être suffisante, et une expression quantitative en fonction du bruit va maintenant être donnée au terme "suffisante".

En admettant que la nature du bruit soit connue, par exemple un bruit Gaussien d'écart type  $\sigma$  et que ce bruit ait été régularisé par une Gaussienne  $g$  (écart type typique de 0.5 pas de quantification)

$$\bar{C}_b = \frac{-2\sigma^2 \|g\| \mu(\varphi)}{\|I\|_\varphi^2}, \text{ ou } \mu(\varphi) \text{ est l'intégrale de } \varphi.$$

5

Alors le rapport signal à bruit de courbure de corrélation se définit par :

$$SNR_C = \left| \frac{C}{\bar{C}_b} \right| \text{ qui est indépendant de l'image.}$$

10

La condition de corrélation est :  $SNR_C$  supérieur à un seuil de l'ordre préférentiellement de 10 (un ordre de grandeur) qui permet de choisir les points retenus. Si cette condition est remplie, le bruit peut être négligé dans le calcul des relations fondamentales et morphologiques, et le modèle établi plus haut est applicable.

15

Une condition morphologique vient donc d'être établie. Cette condition morphologique ne dépend pas de l'écart de position. Il s'agit d'un résultat d'une importance pratique non négligeable. En effet, il est possible de vérifier en tout point de l'image la réalisation de cette condition et ceci sans recourir au calcul laborieux de la corrélation elle-même. Ce résultat justifie a posteriori le choix du coefficient de corrélation pondéré.

20

On a donc effectué ici la modélisation continue de la corrélation non linéaire unidirectionnelle. Il reste à passer au cas discret puisque une image est une suite de points et par conséquent un modèle discret.

## 2. Modélisation discrète de la corrélation non linéaire unidirectionnelle

La modélisation fine du calcul du coefficient de corrélation discret conduit, comme il va être précisé ici, à :

- effectuer un zoom de facteur 2 sur le couple d'images,
- choisir un type de fonction comme fenêtre de corrélation,
- interpoler les images d'entrée et la nappe de corrélation avec un filtre sinus cardinal.

Enfin un test d'arrêt des itérations pour une direction de traitement et un calcul multi niveaux de résolution, dit multiéchelle, seront effectués.

### Echantillonnage

Après avoir effectué un échantillonnage de bonne qualité, c'est-à-dire  $S = R$ , où  $S$  est le support spectral de l'image et  $R$  la cellule réciproque correspondant à l'échantillonnage, on calcule le coefficient de corrélation entre les images numérisées d'un couple stéréoscopique. Ce calcul nécessite de bien exprimer  $I'$  et  $I''$  qui "vivent" spectralement dans  $R+R$  que l'on nommera tout

simplement  $2R$ . Le calcul du coefficient de corrélation  $\rho_0(u_0) = \frac{(\varphi_0 \cdot I) \circ \tilde{I}(u_0)}{\|I\|_{\varphi_0} \sqrt{\varphi \circ \tilde{I}^2(u_0)}}$

à partir de son numérateur et de son dénominateur nécessite un bon échantillonnage de l'image au carré.

Une solution préférée pour calculer le coefficient de corrélation est de calculer séparément numérateur et dénominateur, puis d'en réaliser le quotient. En effet, le calcul direct fait intervenir les dérivées au carré par exemple dans l'expression faisant intervenir  $I'(x)^2$  (cf. relation fondamentale).

Ces deux calculs ne nécessitent bien évidemment qu'en apparence le même support spectral  $2S$ . Le calcul direct s'effectue sur des termes bien plus Haute Fréquence (HF) (terme en  $I''$ ) que celui où dénominateur et numérateur (terme seulement en  $I'$ ) sont calculés séparément avant d'en faire le quotient.

De plus, le calcul du dénominateur fait intervenir un carré de l'image.

Pour satisfaire aux conditions d'échantillonnage précédemment décrites, un zoom de deux sur les images du couple stéréoscopique est réalisé. Ce zoom consiste, pour chacune des images du couple stéréoscopique, à doubler le nombre de points en ligne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues, à doubler le nombre de points en colonne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues, et à déterminer par interpolation les valeurs inconnues en utilisant les valeurs connues. En effet, l'interpolation sur le zoom de deux est une estimation de valeurs intermédiaires dans une série de valeurs connues. L'interpolation sur le zoom de deux des images doit être précise.

La méthode utilise préférentiellement des filtres séparables d'interpolation longs de type sinus cardinal pour les diverses interpolations. La taille du filtre sinus cardinal d'interpolation de l'image pour effectuer un zoom sera préférentiellement de taille 35. Un filtre de type sinus cardinal sera également utilisé pour réaliser les interpolations sur la nappe de corrélation. On prendra préférentiellement un filtre sinus cardinal de taille 11 pour les interpolations sur la nappe de corrélation lors de la recherche sous pixellaire du maximum de corrélation.

Une fois le zoom de deux réalisé, on calcule le coefficient de corrélation entre les images numérisées du couple stéréoscopique. Comme décrit précédemment, une fenêtre 3 de corrélation est nécessaire pour calculer le coefficient de corrélation entre les deux images du couple. Les fenêtres de corrélation peuvent être de différents types. Cependant, certains types de fenêtres minimisent l'impact de l'erreur sur la mesure des écarts de position. L'analyse ayant conduit à la détermination d'un type préféré pour la fenêtre de corrélation va maintenant être présentée.

#### Détermination d'un type préféré pour la fenêtre de corrélation

Au voisinage du maximum, la nappe de corrélation doit être convexe afin d'assurer la convergence de l'algorithme de recherche du maximum principal. En effet, si la nappe de corrélation n'est pas convexe, cela signifie que plusieurs points de la deuxième image du couple d'images peuvent potentiellement correspondre au point courant dans la première image.

Or un seul de ces points est le juste point, c'est-à-dire l'homologue radiométrique vrai, du point courant de la première image. Pour une image de réponse impulsionnelle connue, le voisinage de taille maximum assurant cette propriété de convexité du maximum de la nappe va donc maintenant être recherché.

L'élément le plus fin qui puisse être trouvé sur une image est égal à la réponse impulsionnelle. Dès lors, il suffit d'étudier numériquement la forme de la nappe de corrélation pour un couple d'images identiques réduites à trois réponses impulsionnelles distantes de la longueur  $\Delta l$  appartenant à l'intervalle en pixels  $[0;7]$ , et de rechercher la distance maximum entre les deux réponses impulsionnelles préservant une nappe de corrélation convexe. Alors, cette valeur correspond à l'exploration maximale possible et elle donne un sens à la notion d'écart de position dit "petit" utilisée en introduction du modèle d'images.

L'analyse 1D est suffisante dans le cas de réponses impulsionnelles séparables. Pour réaliser l'analyse 1D, on prend deux images 1,2 identiques présentant des réponses impulsionnelles 301, 302, 303 distantes de  $\Delta l$  304, comme illustré à la figure 12. Le fait de prendre deux images identiques pour former le couple stéréoscopique d'images induit que les homologues géométrique et radiométrique dans la deuxième image d'un point de la première image sont confondus. On fait ensuite glisser suivant la direction d'analyse, la fenêtre 3 de corrélation le long de la deuxième image 2.

Pour chaque déplacement de 1 point de la fenêtre de corrélation, on calcule la corrélation. On obtient les graphiques des figures 4, 5 et 6 présentant le taux de corrélation entre les deux images identiques en fonction de la position de la fenêtre 3 de corrélation sur la deuxième image.

5 L'abscisse  $x=0$  correspond au cas 300 où la fenêtre de corrélation est placée sur l'homologue géométrique du point courant de la première image, c'est-à-dire que l'on mesure le coefficient de corrélation entre un point de la première image et son homologue radiométrique vrai dans la deuxième image.

10 L'abscisse  $x=1$  correspond au cas où la fenêtre de corrélation est décalée dans la deuxième image de 1 point par rapport à la position de l'homologue radiométrique vrai.

L'abscisse  $x=2$  correspond au cas 310 où la fenêtre de corrélation est décalée dans la deuxième image de 2 points par rapport à la position de l'homologue radiométrique vrai, et ainsi de suite.

15 Les résultats de la corrélation sont donnés aux figures 4, 5 et 6 pour les cas SPOT 5.THR (figure 4), Hypomode standard (agglomération par paquet de  $2 \times 2$  des pixels tout en conservant le même échantillonnage) (figure 5) et prolate (figure 6).

20 Comme on peut le remarquer à la figure 4, avec une fenêtre de corrélation de type SPOT5, l'écart de position maximum entre deux réponses impulsionnelles pour conserver une nappe convexe est d'un pixel. Il faudra donc avoir une zone d'exploration ne dépassant pas le pixel. En effet, pour la distance  $\Delta l = 1$ , on a une nappe de corrélation convexe. Par contre, pour la distance  $\Delta l = 2$ , on a plusieurs maximums à la nappe de corrélation.

25 Comme illustré à la figure 12, ces maximums correspondent au cas 300 où la fenêtre de corrélation est placée sur l'homologue radiométrique vrai du point courant de la première image, et à d'autres cas où la fenêtre de corrélation est décalée par rapport à l'homologue radiométrique vrai.

On peut observer quatre maximums secondaires pour  $x=2$ ,  $x=-2$ ,  $x=4$  et  $x=-4$ . Le cas 310 est obtenu pour  $x=2$ , c'est-à-dire lorsque la fenêtre de corrélation est décalée par rapport à l'homologue vrai dans la deuxième image 2. Ce décalage est de deux points suivant la direction de traitement.

5 Le cas 320 est obtenu pour  $x=-2$ , c'est-à-dire lorsque dans la deuxième image, le décalage de la fenêtre de corrélation par rapport à l'homologue vrai est de deux points dans la direction opposée à la direction de traitement. Les cas 320 et 330 sont obtenus pour  $x=4$  et  $x=-4$ .

10 Pour ces quatre cas 310, 320, 330 et 340, on a quatre maximums à la nappe de corrélation. La nappe de corrélation nous donne donc cinq points homologues au point courant de la première image. Or un seul de ces homologues mesurés est l'homologue vrai du point courant de la première image. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'assurer la convexité de la nappe de corrélation. Avec une fenêtre de type SPOT 5, l'écart de position  
15 maximum pour conserver une nappe de corrélation convexe est donc de 1 pixel.

Comme on peut le remarquer à la figure 5, l'hypomodisation standard permet une exploration de 2 pixels. Cela signifie que l'écart de position maximum que l'on peut observer entre deux points homologues est de deux pixels.

20 Comme on peut le remarquer à la figure 6, la fonction prolata permet une exploration de 4 pixels.

La solution prolata assure la meilleure convexité élargie de la nappe de corrélation et de fortes propriétés de continuité sur la mesure des écarts de position. La fonction prolata possède la propriété d'être la fonction positive dont  
25 les supports sont les plus concentrés simultanément en espace et en fréquence. Une méthode préférée utilisera donc une fonction prolata comme fenêtre de corrélation.

Il vient d'être démontré que certains types de fenêtres minimisent l'impact de l'erreur sur la mesure des écarts de position. Cette recherche de la précision



de mesure conduit à opter pour une fenêtre de corrélation égale à la fonction prolate. Par ailleurs, le phénomène d'adhérence est d'autant plus faible que les fenêtres sont de support réduit. Pour minimiser le phénomène d'adhérence, on utilisera donc une fonction prolate de support le plus petit possible compatible avec les conditions d'application du modèle de corrélation fine précédemment décrit et rappelé ci-dessous.

#### Détermination en chaque point d'une taille optimale de la fenêtre de corrélation

Il a précédemment été défini un seuil morphologique  $SNR_C$  lié à la précision de la corrélation. De plus, l'impossibilité de résoudre l'équation fondamentale a été indiquée. Ceci conduit à rechercher des fenêtres de support le plus petit possible compatible avec ce seuil  $SNR_C$ .

Cette approche conduit à rechercher la prolate de support spatial le plus faible, c'est-à-dire de support spectral le plus important, remplissant la condition morphologique dans la direction de traitement. Une adaptation de la fenêtre en tout point pour remplir au mieux la relation morphologique fondamentale va maintenant être proposée :

- Soit la suite de fonctions prolate  $\{P_n\}$  associée à la suite de supports spectraux circulaires décroissants  $\{\varphi_n\}$ .
- Soit  $\varphi_0$  égal à  $C$  le cercle inscrit dans  $2R$  support spectral le plus grand possible sur l'image de zoom 2.

Alors, la recherche de la fenêtre optimale se résume à trouver en tout point la prolate de support spectral circulaire maximal appartenant à la suite  $\{P_n\}$  et vérifiant la condition morphologique. Ceci est réalisé simplement par essais successifs des fonctions prolate de supports spectraux décroissants.

### Traitement multiéchelle

La limite d'exploration imposée par le type de fenêtre de corrélation d'une part, et par la recherche en tout point de la taille de fenêtre la plus petite d'autre part, ne permettent pas de déterminer les points homologues radiométriques d'un couple stéréoscopique lorsque l'écart de position entre ces points est important.

Ce résultat conduit à envisager un traitement en niveaux de résolution (multiéchelle), car il permet par variation de la résolution de l'image de préserver les conditions de convexité de la nappe quelle que soit l'amplitude de l'écart de position recherché. Une variation de la résolution est une variation de la définition du pixel.

Par exemple, si une image est représentée sur un écran de 21 cm en ligne et 18 cm en colonne. Et si cette image présente 210 pixels en ligne et 180 pixels en colonne, alors cette image présente un niveau de résolution de 10 pixels par centimètre. Une diminution du niveau de résolution (passage d'un niveau de résolution fin à un niveau de résolution plus grossier) va correspondre à une diminution du nombre de pixels en ligne et en colonne pour représenter l'image. Pour une diminution de 10 du niveau de résolution, on n'aura plus que 21 pixels en lignes et 18 en colonne, soit un niveau de résolution de un pixel par centimètre.

L'approche multi niveau de résolution (multiéchelle) dyadique est nécessaire pour remplir la condition de convexité de la nappe de corrélation quelle que soit l'amplitude des écarts de position. Le couple d'images est dégradé en résolution par convolution par une prolate de support spectral de rayon  $r_{C/s}$ , où «  $r_C$  » est le rayon correspondant à l'image zoomée d'un facteur 2, et «  $s$  » est le niveau de résolution courant.

La descente en niveau de résolution nécessite de boucher les trous, ou points non renseignés des cartes des écarts de position. Les trous sont bouchés

itérativement par convolution avec une prolata circulaire de rayon 7 par exemple. A chaque itération les points manquants sont tour à tour renseignés. Ainsi est calculé une carte exhaustive des écarts. L'itération à chaque niveau de résolution consiste par interpolation successive à corriger géométriquement à l'aide de cette carte suivant une direction, par exemple la direction épipolaire, la deuxième image pour la rendre de plus en plus semblable géométriquement à la première image.

En outre, il est possible – si le cas épipolaire n'est pas pur – d'explorer successivement les directions orthogonales (ligne et colonne), de calculer successivement des écarts de position monodirectionnels par corrélation, et d'effectuer les interpolations unidirectionnelles correspondantes. La connaissance des écarts de position maximaux en ligne et colonne induisent une profondeur de traitement en niveau de résolution potentiellement différents suivant les lignes et les colonnes. Le nombre de niveaux de résolution dyadiques nécessaires est :

- en ligne :  $s_l = \log_2(\max_l)$ ,
- et en colonne :  $s_c = \log_2(\max_c)$ ,

où  $\max_l$  et  $\max_c$  sont les écarts de position maximaux respectivement en ligne et colonne.

A chaque niveau de résolution, les opérations d'interpolation de la deuxième image, suivant les cartes des écarts de position monodirectionnels successives calculées, nécessitent l'application d'une formule de composition des cartes des écarts de position. Après chaque itération est effectuée la composition entre la carte des écarts de position entre l'image interpolée et la première image et la carte des écarts de position qui a permis de générer l'image interpolée (c'est-à-dire la carte des écarts de position de l'itération précédente). Ainsi, les erreurs d'interpolation ne se cumulent-elles pas à travers

les itérations car nous sommes toujours dans le cas de la composition de deux écarts de position au maximum.

La disparité composée avec recalage barycentrique après deux itérations s'exprime de la manière suivante (sachant que la première est toujours régularisée et sans trous de corrélation) :

- Soit  $\varepsilon_1$  la première carte des écarts de position entre l'image  $\tilde{I}$  et la première image  $I$ . Cette fonction est continue et régulière.

- Soit  $\tilde{I}_1(n) = \tilde{I}(n + \varepsilon_1(n - \xi_1))$  l'image  $\tilde{I}$  corrigée des écarts de position  $\varepsilon_1$  de barycentre  $\xi_1$  où  $u_1(n) \approx -\varepsilon_1(n - \xi_1)$  et  $\tilde{I}_2(m) = \tilde{I}_1(m + \varepsilon_2(m - \xi_2))$ , l'image  $\tilde{I}_1$  corrigée des écarts de position  $\varepsilon_2$  de barycentre  $\xi_2$  où  $u_2(m) \approx -\varepsilon_2(m - \xi_2)$ .  $u_1(n)$  et  $u_2(m)$  sont les mesures d'écarts de position mesurés barycentriquement, alors :

$$- \tilde{I}_2(m) = \tilde{I}_1(m + \varepsilon_2(m - \xi_2)) = \tilde{I}(m + \varepsilon_2(m - \xi_2) + \varepsilon_1(m + \varepsilon_2(m - \xi_2) - \xi_1)) .$$

#### Critère de rejet des points mal appariés

Il a été précédemment fait mention de points non renseignés. Un point non renseigné est un point de la première image dont l'appariement avec un point de la deuxième image a été rejeté. Le critère de rejet des points de fausse corrélation consiste à comparer point à point les courbures de corrélation entre la première image et la deuxième image corrigée des écarts de position (interpolée dans la grille de référence).

Un point est rejeté à chaque niveau de résolution quand l'écart entre les valeurs de courbures entre les deux images est supérieur à une valeur. Cette valeur est égale au minimum d'écart aux 4 points connexes du point courant de la première image.

Enfin, pour chaque direction de traitement et pour le niveau de résolution de l'image, les points calculés à partir de prolates de supports contenant une prolate de supports plus petits sont éliminés car la corrélation en ces points est de précision obligatoirement plus faible.

### 3. Méthode de corrélation fine bidirectionnelle

Le cas de la méthode de corrélation fine unidirectionnelle a été exposé ci-dessus pour faciliter la compréhension du modèle. Le cas de la méthode de corrélation fine bidirectionnelle va maintenant être présenté.

Les images du couple stéréoscopique sont rééchantillonnées en géométrie épipolaire suivant les lignes ou les colonnes par interpolation. La recherche des tableaux de disparité 2D est effectuée alternativement suivant les lignes et les colonnes. La difficulté majeure de restitution de la table des écarts de position est généralement celle suivant la direction épipolaire.

Les écarts de position provoqués par le relief sont en général très haute fréquence alors que ceux suivant la direction orthogonale sont souvent provoqués par des vibrations du porteur et sont basse fréquence. Ceci autorise des fenêtres de traitement plus grandes suivant la direction perpendiculaire aux épipolaires. Cette différence sera naturellement gérée par le choix d'un rapport signal à bruit plus important suivant la direction orthogonale aux épipolaires que suivant la direction épipolaire.

La condition fondamentale unidirectionnelle si  $\vec{v}$  est la direction épipolaire est la relation unique :

$$C_v / \bar{C}_b > SNR_c$$

La figure 7 présente le masque 23 des points conservés après application du critère de la courbure géométrique sur l'image de type campagne 20 avec une fenêtre 9x9 de type prolate. Ce masque 23 des points conservés

est obtenu en faisant l'intersection du masque 21 des points conservés après application du critère en ligne, avec le masque 22 des points conservés après application du critère en colonne.

Les zones noires de l'image correspondent aux points ayant été rejetés après application de la condition morphologique. Les points en blanc représentent les points conservés. Les images de la figure 7 sont représentées en noir et blanc pour une meilleure visualisation des points conservés.

Comme l'illustre la figure 7, le masque 21 appliqué en ligne présente 57.29% de points conservés, le masque 22 appliqué en colonne présente 53.52% de points conservés, enfin, le masque 23 intersection des deux précédents présente seulement 45.64% de points conservés. Cette illustration confirme l'avantage non négligeable de l'utilisation du repère épipolaire qui implique une condition morphologique unidirectionnelle.

#### 4. Méthode de corrélation fine multidirectionnelle

L'image ainsi interpolée est ensuite analysée suivant sa direction orthogonale. Ce procédé est itéré.

#### 5. Procédé d'appariement mis en place à partir du modèle de corrélation fine

Le procédé de calcul basé sur la méthode de corrélation fine précédemment décrite va maintenant être détaillé en référence à la figure 11. Le procédé de corrélation s'adapte automatiquement à l'image dès que l'on a fixé le rapport signal à bruit de courbure de corrélation SNR<sub>c</sub>.

Ce procédé de calcul est multi niveaux de résolution (multiéchelle) dyadique. Cela signifie que le traitement aura lieu pour différents niveaux de résolution. Le nombre de niveaux de résolution est connu dès que l'écart de position maximale le long de la ligne et le long de la colonne l'est.

Le procédé de calcul basé sur la méthode de corrélation fine est multidirectionnel. Les tailles de fenêtres de corrélation (prolate) sont calculées automatiquement en tout point et à tous les niveaux de résolution avec des fenêtres de corrélation qui peuvent être très différentes dans la direction épipolaire et la direction orthogonale. Elles sont fixées par le rapport signal à bruit de courbure de corrélation différent suivant la direction épipolaire et la direction orthogonale. On procédera en niveaux de résolution croissants, c'est-à-dire du plus grossier au plus fin.

#### A Données :

La première étape du procédé consiste à l'acquisition des données d'entrée. Pour utiliser le procédé, les données nécessaires en entrée sont les suivantes :

- le couple stéréoscopique d'images, à savoir la première image et la deuxième image. Ces deux images sont acquises à l'aide d'un système d'acquisition particulier décrit plus précisément dans la suite du document. Ce système permet l'acquisition d'un couple d'images pour un faible coefficient stéréoscopique. Ce système d'acquisition est un instrument unique comprenant 2 capteurs CCD, chaque capteur permettant l'acquisition d'une image du couple stéréoscopique.
- l'écart type du bruit et le type de fonction FTM (donnée) : à savoir « prolate », « spot5 », « hypomode »...
- les images du couples sont exprimées en direction épipolaire ligne ou colonne,
- la valeur de l'écart de position maximum suivant les épipolaires et la valeur de l'écart de position maximum suivant la direction orthogonale. Ces valeurs représentent les seuils maximums du décalage, suivant les deux directions de traitement, entre un point de la première image et son homologue dans la deuxième image. Ces valeurs vont permettre de

déterminer le nombre de niveaux de résolution nécessaires pour trouver l'homologue dans la deuxième image d'un point de la première image.

### B Paramètres utilisateurs

5

A l'étape suivante, l'utilisateur est invité à entrer un paramètre d'exhaustivité pour le procédé:

10

- le choix d'un rapport signal sur bruit (SNR) talon de corrélation suivant la direction épipolaire et le choix d'un SNR talon de corrélation suivant la direction orthogonale : SNR\_e, SNR\_o. Préférentiellement on proposera SNR\_e=10 et SNR\_o=100. Ces paramètres SNR\_e et SNR\_o vont servir de valeurs seuils dans la détermination en chaque point de la première image, d'une taille optimale pour la fenêtre de corrélation suivant chaque direction de traitement.

15

### C Paramètres algorithmiques

Un certain nombre d'autres paramètres sont pré réglés :

20

- le rayon maximum de la prolate circulaire de corrélation. Ce rayon est le seuil définissant la taille maximum autorisée pour la fenêtre de corrélation. Ce rayon maximum sera préférentiellement égal à 25 pour un zoom image de 2.
- le nombre d'itérations pour chaque direction de traitement, préférentiellement égal à 2.
- le nombre d'itérations, lors du comblement de parties lacunaires de la carte des écarts de position. En effet, le procédé permet de définir les écarts de position entre les points de la première image et leurs homologues respectifs dans la deuxième image. Tous les écarts de position mesurés sont placés sur une carte des écarts de position.

25



Cependant, parmi ces écarts, ceux qui ne répondent pas à un critère de ressemblance sont rejetés. La carte des écarts de position présente donc des points pour lesquels l'écart de position entre un point de la première image et son homologue dans la deuxième image n'est pas renseigné.

Ces points non renseignés de la carte des écarts de position sont appelés parties lacunaires, et le nombre d'itérations lors du comblement de ces points est préférentiellement égal à 10.

- le zoom de 2 des images du couple à tous les niveaux de résolution.

#### D Initialisation

A partir des données d'entrée, certains paramètres sont initialisés.

On effectue donc le calcul du nombre de niveaux de résolution suivant la direction épipolaire  $S_e$  et la direction orthogonale  $S_o$  en fonction des valeurs des écarts de position maximums (suivant les deux directions de traitement) obtenues lors de la phase A. Le nombre de niveaux de résolution dyadiques nécessaire est calculé à l'aide de la formule du logarithme à base 2 des écarts de position maximums en ligne et colonne précédemment citée :

- $s_e = \log_2(\text{valeur maximum du décalage selon la direction épipolaire}),$
- $s_o = \log_2(\text{valeur maximum du décalage selon la direction orthogonale}),$

Par ailleurs, les images d'entrée doivent être filtrées, lors du premier passage dans la boucle principale de traitement du procédé de corrélation. Ceci permet d'atténuer le bruit des images d'entrée. On effectue donc un :

- filtrage du couple stéréoscopique d'images par convolution avec une fenêtre de convolution. Cette fenêtre de convolution sera préférentiellement une prolate circulaire de rayon égal à 7. Cette opération de filtrage de la première et de la deuxième image du couple permet de régulariser les points de ces images.

- filtrage de l'image de bruit par convolution avec une fenêtre de convolution. Cette fenêtre de convolution sera préférentiellement de type prolata circulaire de rayon préférentiellement égal à 7. L'intérêt de cette opération est là encore de régulariser les points de l'image de bruit.
- interpolation dans la géométrie épipolaire du couple d'images. Les images du couple stéréoscopique sont rééchantillonnées en géométrie épipolaire suivant les lignes ou les colonnes par interpolation.

#### E Procédé pour chaque niveau de résolution

On effectue alors le traitement des images du couple stéréoscopique en niveaux de résolution dyadique, alternativement si besoin, suivant la direction épipolaire et orthogonale à la direction épipolaire (fonction de la profondeur de traitement en niveaux de résolution suivant la ligne et la colonne). Pour le traitement, on commence par le niveau de résolution le plus grossier et on passe progressivement au niveau de résolution le plus fin. Les étapes qui suivent seront effectuées pour chaque niveau de résolution et se divisent en deux catégories qui sont la préparation des données et la corrélation des images stéréoscopiques :

##### E.1 Préparation des données

L'étape de préparation des données est effectuée en réalisant les étapes suivantes :

- la convolution des images du couple par la prolata (prolata circulaire de taille préférentiellement égale à 7 pour le niveau de résolution 1, prolata séparable pour les autres). Cette convolution permet la dégradation en résolution des images de départ du couple.

- le zoom de deux de la première image, de la deuxième image et de l'image de bruit. Ce zoom de deux est réalisé par interpolation à l'aide d'une fonction de type sinus cardinale. L'opération d'interpolation consiste à, pour chaque image interpolée :

- doubler le nombre de points en ligne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues.
- doubler le nombre de points en colonne en insérant un point de valeur inconnue entre deux points de l'image de valeurs connues.
- passer une fenêtre pondérée de type sinus cardinale en chaque point de valeur inconnue et estimer la valeur de ce point grâce aux points de valeurs connues.

- la détermination de la fenêtre de corrélation optimale. Pour cela, on effectue le calcul en tout point de la première image du rapport signal sur bruit de courbure de corrélation  $SNR_c$  en fonction de la fenêtre de corrélation (prolate circulaire). Puis on choisit la plus petite fenêtre de corrélation, suivant la direction épipolaire et perpendiculaire, vérifiant la condition  $C_v / C_b > SNR_c$ . Cette détermination est effectuée en réalisant, en chaque point de l'image, les étapes suivantes:

- calcul de la courbure de corrélation du bruit  $C_b$  sur l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation de type prolate. Ce calcul est réalisé en utilisant la formule de la courbure de corrélation citée lors de la présentation du modèle de corrélation fine unidirectionnelle,
- calcul de la courbure de corrélation de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation de type prolate,
- calcul pour chaque fenêtre de corrélation de type prolate du rapport signal sur bruit de courbure de corrélation ( $SNR_c$ ) rapport des courbures précédentes,

- o choix de la plus petite taille de fenêtre de corrélation de type prolate tel que  $|C_v / C_b| > SNR_{-e}$  et  $|C_v / C_b| > SNR_{-o}$ .

## E.2 Corrélation des images stéréoscopiques

5

Une fois les données préparées, on entre dans l'étape de traitement des données. Cette étape comprend les sous étapes qui suivent. Ces sous étapes sont réitérées pour chaque point de l'image et suivant chaque direction de traitement :

10

Pour chaque point de la première image, et pour chaque direction de traitement, on effectue :

15

- l'interpolation de la deuxième image avec la carte de disparité cumulée trouvée à l'itération précédente, c'est-à-dire pour le niveau de résolution précédent. Cette interpolation de l'image 2 est faite à l'aide de la carte de disparité.

20

- le calcul de l'écart de position par corrélation dans la fenêtre de corrélation, entre le point courant de la première image et son homologue supposé dans la deuxième image. Ce calcul est réalisé pour tous les points de la première image et permet l'obtention d'une carte des écarts de position intermédiaire (c'est-à-dire une carte où la technique de correction barycentrique notamment n'a pas été réalisée).

25

- le recalage barycentrique à chaque niveau de résolution au point près de la carte des écarts de position (intermédiaire). Ceci permet de limiter l'impact du phénomène d'adhérence de la corrélation précédemment présenté. En un point de la carte des écart de position, l'étape de recalage barycentrique consiste à déterminer le barycentre des points contenus dans la fenêtre de corrélation ayant

servi pour la détermination de l'écart de position entre le point courant de la première image et son homologue dans la deuxième image. Puis à assigner à ce barycentre la valeur de l'écart de position du point courant dans la carte des écarts de position.

- 5       - Pour une même résolution :
- le rejet des points issus de fenêtres plus importantes et contenant des fenêtres plus petites. En effet, la corrélation en ce point à l'aide de la fenêtre de corrélation de plus grande taille est de précision obligatoirement plus faible.
- 10       - le rejet des points homologues de rayons de courbure trop différents après l'interpolation de la position de la deuxième image. Pour cela, on va effectuer pour chaque résolution et direction :
  - o le calcul de la courbure de corrélation du point courant (point étudié) de la première image,
  - 15       o le calcul de la courbure de corrélation de l'homologue dans la deuxième image du point courant de la première image,
  - o le calcul de la différence entre les deux courbures précédemment calculées (écart entre les courbures de corrélation du point courant et de son homologue dans la
  - 20       deuxième image),
  - o le calcul de l'écart de courbure minimum entre les courbures de corrélation des quatre voisins (dans la première image) au point courant et la courbure de corrélation du point courant.
  - o le rejet du point homologue si l'écart de courbure entre le point
  - 25       courant et son homologue est plus important que l'écart inférieur calculé sur les quatre voisins du point courant de la première image.
- le rebouchage itératif (préférentiellement 10 itérations) des cartes des écarts de position lacunaires en passant par les points existants. En effet,

on a vu que les points homologues d'écarts de courbure trop différents étaient rejetés. Par conséquent certains points de la carte des écarts de position vont être non renseignés. On effectue donc un rebouchage itératif de la carte des écarts de position. De plus la correction barycentrique produit des trous.

Pour cela, on effectue :

- la convolution par une fenêtre de convolution de type prolate,
- le rebouchage des points non renseignés de la carte des écarts de position par convolution par une prolate.
- le lissage de la carte des écarts de position par une prolate séparable correspondant au niveau de résolution courant (circulaire au niveau de résolution de l'image). Ce lissage permet de débruiter la carte des écarts de position.
- à la composition de la table des écarts de position courante avec celle calculée à la précédente itération (cumul). Cette composition permet de mettre à jour la table des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.

On effectue le traitement pour tous les niveaux de résolution en éliminant les points calculés avec une fenêtre de corrélation prolate contenant une fenêtre de corrélation prolate plus petite et ceci suivant les deux directions de traitement. On obtient alors en sortie du procédé la carte des écarts de position pour le niveau de résolution le plus fin.

### F Sorties

On obtient à la dernière étapes du procédé les données de sortie du procédé. Il s'agit de tableaux de tailles égales à la taille de la première et de la deuxième image. Ces tableaux sont :

- la carte des écarts de position (2 tableaux),

- la carte des tailles de prolates (2 tableaux) en tout point renseigné (non rejeté) de la première image au niveau de résolution le plus grossier.

Le procédé présenté ci-dessus est mis en œuvre dans un ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images. Cet ensemble d'acquisition et d'appariement comprend un système d'acquisition et un système de traitement.

Le système d'acquisition permet l'acquisition des données d'entrées du procédé (étape A du procédé). Ce système d'acquisition est par exemple un satellite et comprend des moyens de communication (pour la communication avec le système de traitement), des moyens de traitement (de type processeur), des moyens mémoire (pour stocker les images acquises) et un capteur optoélectronique (système optique + capteurs CCD).

Le système de traitement permet quant à lui de réaliser l'appariement du couple stéréoscopique d'images. Le système de traitement est par exemple une station de travail comprenant des moyens mémoires (RAM, ROM) connectés à des moyens de traitement tel qu'un processeur, des moyens de visualisation tels qu'un écran d'affichage et des moyens de saisie tels qu'un clavier et une souris. Le système de traitement est connecté avec des moyens de communication afin de recevoir les images à apparier acquises par le système d'acquisition.

Une comparaison de la méthode de corrélation fine avec des méthodes ne faisant pas intervenir le zoom de 2 du couple stéréoscopique d'images, la modélisation de la corrélation avec la recalage barycentrique, et le calcul multi niveaux de résolution (ou multiéchelle) du maximum de la nappe de corrélation est proposée, à partir de simulations représentées à la figure 7.

Les résultats obtenus pour quatre méthodes d'appariement d'images stéréoscopiques sont présentés (fig. 8 précision en fonction du  $b/h$ ), ces méthodes étant : la méthode de corrélation standard par une fenêtre de

corrélation de type prolata 26, la méthode de corrélation standard par une  
fenêtre de corrélation de type constante 25, la méthode de corrélation fine par  
une fenêtre de corrélation de type prolata 27, et la méthode de corrélation fine  
par une fenêtre de corrélation de type prolata en enlevant les points issus de  
fenêtres incluant des fenêtres plus petites 28.

Les images du couple sont des images de Marseille de pas  
d'échantillonnage un mètre avec une fonction de transfert respectant quasiment  
le principe de Shannon (valeur proche de 0 à la fréquence de coupure). Le  
rapport signal à bruit des images est égal à 100.

L'acquisition des images du couple stéréoscopique est matricielle. Ces  
images sont calculées à partir d'une orthophotographie échantillonnée à un  
mètre et d'un modèle numérique de terrain de précision submétrique couvrant la  
même zone.

Des couples d'images stéréoscopiques sont générés pour plusieurs b/h.  
Ce coefficient prend des valeurs entre 0.005 et 0.25. Ce coefficient est provoqué  
par le seul dépointage en tangage.

Comme représenté à la figure 8, la précision avec la méthode de  
corrélation fine est deux fois meilleure que celle mesurée avec les méthodes  
classiques. De plus, on peut considérer que la corrélation fine est de précision  
constante pour des b/h entre 0.01 et 0.15. La précision altimétrique dont l'écart  
type est ici présenté en ordonnée avec comme unité le pixel est meilleure que le  
pixel. Cette méthode conserve une précision subpixellaire avec de faibles  
coefficients stéréoscopiques (b/h).

Par ailleurs, la méthode préconisée dite de corrélation fine sans inclusion  
de fenêtres permet de rejeter les points d'ombres qui sont souvent aberrants. Le  
taux de corrélation est proche de 1 si l'on néglige le phénomène d'ombre.

Le procédé d'appariement d'images stéréoscopiques décrit ci-dessus  
permet donc le traitement d'images stéréoscopiques pour un faible coefficient  
stéréoscopique (b/h faible) avec la même précision altimétrique que pour des



coefficients stéréoscopiques forts. Ce procédé fonctionne jusqu'à des coefficients stéréoscopiques très faibles (0.01) sans dégrader la précision altimétrique.

5 Ce procédé de corrélation fine est mis en œuvre dans le système de traitement de l'ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images.

10 Ce procédé permet une nouvelle conception des systèmes spatiaux d'acquisition et de photographie aptes à acquérir le couple stéréoscopique d'images. Un coefficient stéréoscopique (b/h) proche de 0.02 limite les directions de visées homologues à une valeur inférieure à  $\pm$  un degré.

Un nouveau type de système spatial d'acquisition permettant l'acquisition du couple stéréoscopique d'images est représenté à la figure 9.

15 Contrairement aux systèmes d'acquisition de l'art antérieur, le système d'acquisition selon la présente invention comporte un instrument d'acquisition unique (non représenté) comprenant un système optique unique (non représenté) et deux capteurs CCD 31, 32 symétriques dans le plan focal optique.

20 Chaque capteur CCD représenté à la figure 9 est une barrette constituée de détecteurs 33a, 33b, 33c. Ces détecteurs 33a, 33b, 33c sont par exemple des photodiodes électroniques sensibles CCD à la lumière et capable de convertir le signal lumineux en un courant électrique proportionnel à l'intensité de cette lumière. Ces détecteurs 33a, 33b, 33c sont placés côte à côte, en ligne et forment la barrette 33. Chaque détecteur 33a, 33b, 33c est chargé de l'observation d'un pixel. Chaque détecteur 33a, 33b, 33c capte la lumière  
25 provenant d'un pixel de terrain.

Le principe de fonctionnement d'un tel système d'acquisition d'image stéréoscopique dans le cas spatial est le suivant.

Chaque barrette 33, 34 permet l'acquisition d'une ligne d'image. La barrette 33 permet l'acquisition d'une ligne de la première image, et la barrette 34 l'acquisition d'une ligne de la deuxième image.

La première image et la deuxième image du couple stéréoscopique sont donc acquises ligne par ligne par les barrettes CCD 33, 34 au fur et à mesure de l'avancement du satellite sur son orbite (entre le temps  $t$  et  $t+\Delta t$ ).

Les lignes d'images acquises par les premières et deuxièmes barrettes 33, 34 sont stockées dans des moyens mémoire.

Une fois les deux images 1, 2 acquises, le système d'acquisition envoie (par des moyens de communication sans fil) le couple stéréoscopique d'images 1, 2 au système de traitement. Ce système de traitement est préférentiellement basé au sol et permet l'appariement des points du couple.

Dans le cas d'un système d'acquisition spatiale les deux barrettes introduites dans le plan focal peuvent être remplacées par deux matrices (chaque matrice étant constituée d'un ensemble de détecteurs CCD répartis en lignes et colonnes) également situées dans le plan focal.

Ceci peut être réalisé également avec un appareil photographique non spatial. Dans le cas d'un appareil photographique, le système d'acquisition du couple stéréoscopique d'images comportera un capteur optoélectronique comprenant un système optique unique et deux capteurs CCD symétriques dans le plan focal.

Le procédé d'appariement fin d'un couple stéréoscopique d'images mis en œuvre dans le système de traitement reste valable pour les systèmes d'acquisition comprenant un instrument spatial unique constitué de deux matrices ou de deux barrettes dès lors que les perturbations d'attitudes sont corrigées ou négligeables.

REVENDEICATIONS

1. Ensemble d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images (1, 2) comprenant un système d'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images et un système de traitement du couple stéréoscopique acquis,  
caractérisé en ce que  
le système d'acquisition du couple stéréoscopique comporte un instrument d'acquisition unique (30) comprenant deux capteurs CCD (31, 32) dans le plan focal optique, chaque capteur CCD (31, 32) permettant l'acquisition d'une image (1, 2) du couple stéréoscopique d'images.
2. Ensemble selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque capteur CCD est une barrette CCD (33, 34).
3. Ensemble selon la revendication 1, caractérisé en ce que chaque capteur CCD est une matrice CCD (33, 34).
4. Ensemble selon la revendication 1 ou 2 ou 3, caractérisé en ce que le système de traitement comporte :
  - des moyens aptes à traiter les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, lesdits moyens de traitement comprenant des moyens qui, pour chaque changement de niveau de résolution, sont aptes à :
    - déterminer, en chaque point de la première image (1), une fenêtre de corrélation (3) optimale,
    - calculer, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point (40) de la

première image (1) et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image (2),

- obtenir, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point (40) de la première image et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image,

- effectuer un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue.

- des moyens aptes à obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image (1) et son homologue radiométrique dans la deuxième image (2).

5. Ensemble selon l'une des revendications 4, caractérisé en ce que les moyens aptes à traiter les deux images du couple comprennent en outre :

- des moyens aptes à effectuer une convolution des images (1, 2) du couple par une fenêtre de convolution,

- des moyens aptes à effectuer un zoom de taille 2 des images (1, 2) du couple stéréoscopique.

6. Ensemble selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce que les moyens aptes à déterminer la fenêtre de corrélation optimale en chaque point de la première image comprennent :

- des moyens aptes à calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),

- des moyens aptes à calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),

- des moyens aptes à calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNRc) des courbures précédentes,

et des moyens aptes à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à un paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.

- 5 7. Ensemble selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, caractérisé en ce que les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre des moyens aptes à effectuer une interpolation de la deuxième image (2) grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.
- 10 8. Ensemble selon la revendication 7, caractérisé en ce que les moyens aptes à traiter les deux images comprennent en outre :
- 15 - des moyens aptes à rejeter les points homologues (40, 41) issus de fenêtres de corrélation (3) plus grandes et contenant des fenêtres de corrélation (3) plus petites.
- des moyens aptes à rejeter les points homologues (40, 41) de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image (2).
- 20 - des moyens aptes à compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants.
- des moyens aptes à lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution.
- 25 - des moyens aptes à composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.

9. Ensemble selon l'une des revendications 8, caractérisé en ce que des moyens aptes à rejeter les points homologues vérifiant une condition de rejet comprennent :

- 5           - des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer sur la première image (1) les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première  
10       image (1),
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer, dans la deuxième image (2), son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à calculer l'écart entre  
15       sa courbure et celle du point homologue,
- des moyens qui, pour le point courant, sont aptes à rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image (1).

20       10. Procédé d'acquisition et d'appariement d'un couple stéréoscopique d'images, caractérisé en ce qu'il comprend l'acquisition d'un couple stéréoscopique d'images (1, 2) par un instrument d'acquisition unique (30) comprenant deux capteurs CCD (31, 32) situés dans le plan focal optique (19'), le premier capteur (31) permettant l'acquisition d'une première image  
25       (1) du couple, et le deuxième capteur (32) permettant l'acquisition d'une deuxième image (2) du couple.

11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il comporte en outre les phases consistant à :

- traiter grâce à des moyens de traitement les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique, selon au moins une direction de traitement et selon différents niveaux de résolution du plus grossier au plus fin, en, pour chaque changement de niveau de résolution :

5           - déterminant, en chaque point de la première image (1), une fenêtre de corrélation (3) optimale,

          - calculant, par corrélation avec les fenêtres de corrélation déterminées, les écarts de position entre chaque point (40) de la première image (1) et son homologue radiométrique (41) dans la

10           deuxième image (2),  
          - obtenant, pour le niveau de résolution courant, une carte des écarts de position entre chaque point (40) de la première image et son homologue radiométrique (41) dans la deuxième image,

15           - effectuant un recalage barycentrique des points de ladite carte obtenue.

          - obtenir, pour le niveau de résolution le plus fin, la carte des écarts de position entre chaque point de la première image (1) et son homologue radiométrique dans la deuxième image (2).

20       12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'il comporte une phase consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire.

25       13. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'il comporte une phase consistant à traiter grâce à des moyens de traitement les deux images (1, 2) du couple stéréoscopique selon une direction épipolaire et une direction orthogonale à la direction épipolaire.

14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une phase de saisie par un utilisateur d'au moins un paramètre d'exhaustivité correspondant au choix d'un rapport signal sur bruit de corrélation suivant chaque direction de traitement.

5

15. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, caractérisé en ce qu'il comporte en outre une phase d'acquisition de données comprenant l'acquisition :

- d'une image de bruit par chaque capteur CCD,
- du type de la fenêtre de corrélation,
- d'une direction épipolaire pour chaque image (1, 2) du couple pour un coefficient stéréoscopique moyen,
- d'au moins une valeur de l'écart de position maximum suivant chaque direction de traitement.

10

15

16. Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce que le procédé comprend en outre une phase de prétraitement des données consistant à :

- calculer un nombre de niveaux de résolution suivant chaque direction de traitement en fonction de chaque valeur de l'écart de position maximum,
- filtrer les images (1, 2) du couple stéréoscopique d'images par convolution avec une fenêtre de convolution,
- filtrer l'image de bruit par convolution avec ladite fenêtre de convolution,
- interpoler dans une géométrie épipolaire le couple stéréoscopique d'images.

20

25

17. Procédé selon l'une des revendications 11 à 16, caractérisé en ce que la phase de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :



- effectuer une convolution des images (1, 2) du couple par une fenêtre de convolution,
- effectuer un zoom de taille 2 des images (1, 2) du couple stéréoscopique.

5

18. Procédé selon la revendication 14, caractérisé en ce que l'étape de détermination de la fenêtre de corrélation optimale consiste à, pour chaque point de la première image :

10

- calculer une courbure de la première image pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),
- calculer une courbure de l'image de bruit pour chaque taille de fenêtre de corrélation (3),
- calculer, pour chaque taille de fenêtre de corrélation, le rapport (SNRc) des courbures précédentes,

15

et à choisir la plus petite taille de fenêtre de corrélation telle que ledit rapport soit supérieur à chaque paramètre d'exhaustivité saisi par l'utilisateur.

20

19. Procédé selon l'une des revendications 11 à 18, caractérisé en ce que la phase de traitement des images comprend en outre une étape consistant à effectuer une interpolation de la deuxième image (2) grâce à une carte des écarts de position obtenue pour un niveau de résolution précédent.

25

20. Procédé selon la revendication 19, caractérisé en ce que la phase de traitement des images comprend en outre les étapes consistant à :

- rejeter les points homologues issus de fenêtres de corrélation plus grandes et contenant des fenêtres de corrélation plus petites.
- rejeter les points homologues (40, 41) de rayons de courbure vérifiant une condition de rejet après interpolation de la deuxième image (2).

- compléter itérativement, dans la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant, des points d'écarts de position lacunaires en fonction des points d'écarts de position existants.
- lisser la carte des écarts de position correspondant au niveau de résolution courant par une fenêtre de convolution.
- composer la carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution courant avec la carte des écarts de position calculée pour le précédent niveau de résolution afin de mettre à jour ladite carte des écarts de position calculée pour le niveau de résolution précédent.

21. Procédé selon l'une des revendications 20, caractérisé en ce que l'étape de rejet des points homologues vérifiant une condition de rejet consiste à, pour le point courant :

- calculer sur la première image (1) les courbures de ses deux points voisins suivant chaque direction de traitement,
- calculer l'écart inférieur des courbures des 4 connexes au point courant de la première image,
- calculer, dans la deuxième image, son point homologue interpolé par la carte des écarts de position,
- calculer l'écart entre sa courbure et celle du point homologue,
- rejeter le point homologue si cet écart est plus important que l'écart inférieur calculé sur la première image.

22. Procédé selon l'une des revendications 11 à 21, caractérisé en ce que la phase d'obtention, pour le niveau de résolution le plus fin, de la carte des écarts de position, comprend l'obtention :

- d'au moins un tableau représentant la carte des écarts de position suivant chaque direction de traitement,

- d'au moins un tableau représentant une carte des tailles des fenêtres de corrélation employées en tout point non rejeté de la première image, suivant chaque direction de traitement.

- 5 23. Procédé selon l'une des revendications 11 à 22, caractérisé en ce que les fenêtres de convolution et de corrélation utilisées sont des fenêtres de convolution et de corrélation de type prolate.

1/9

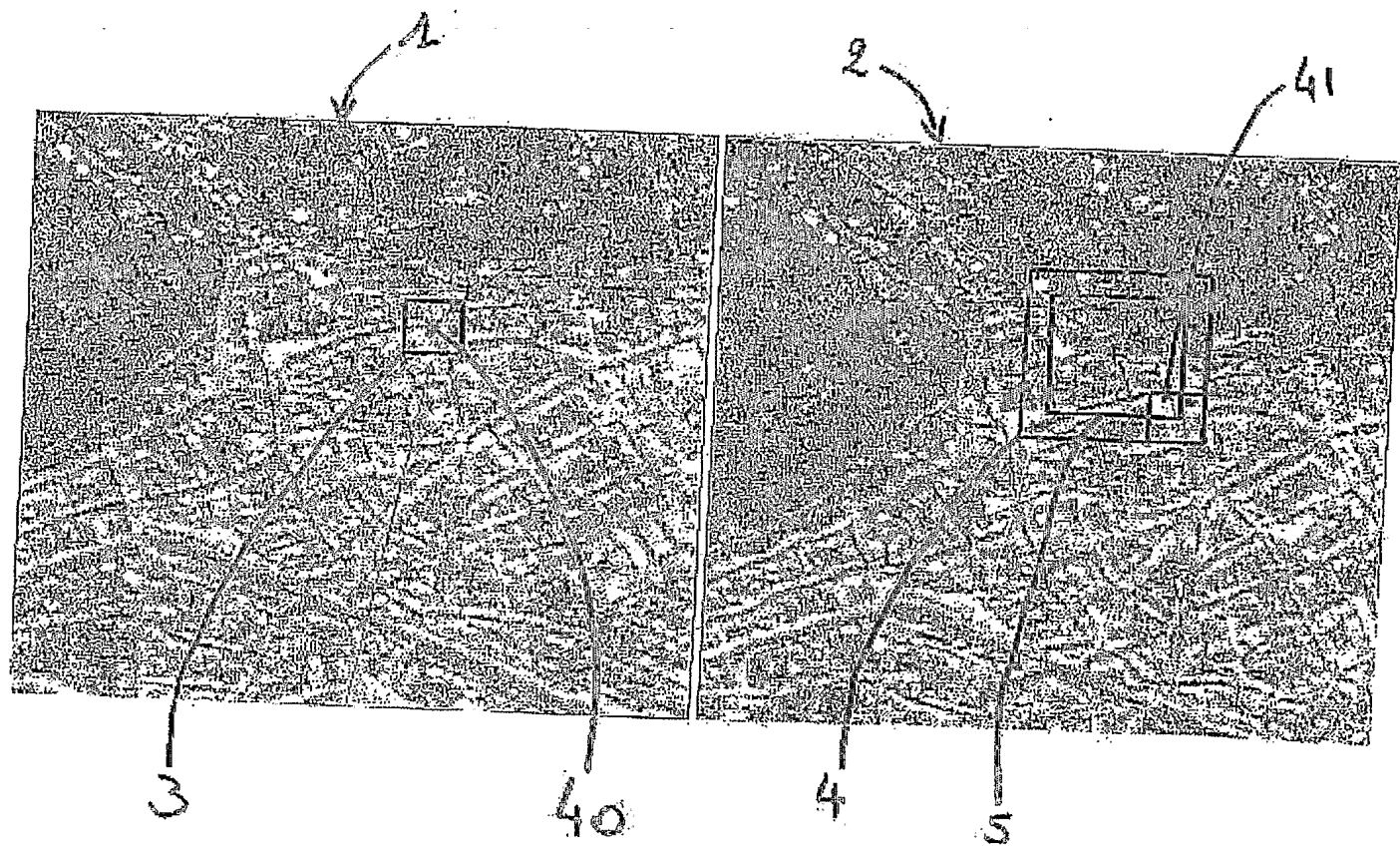


FIGURE 1

1 / 9

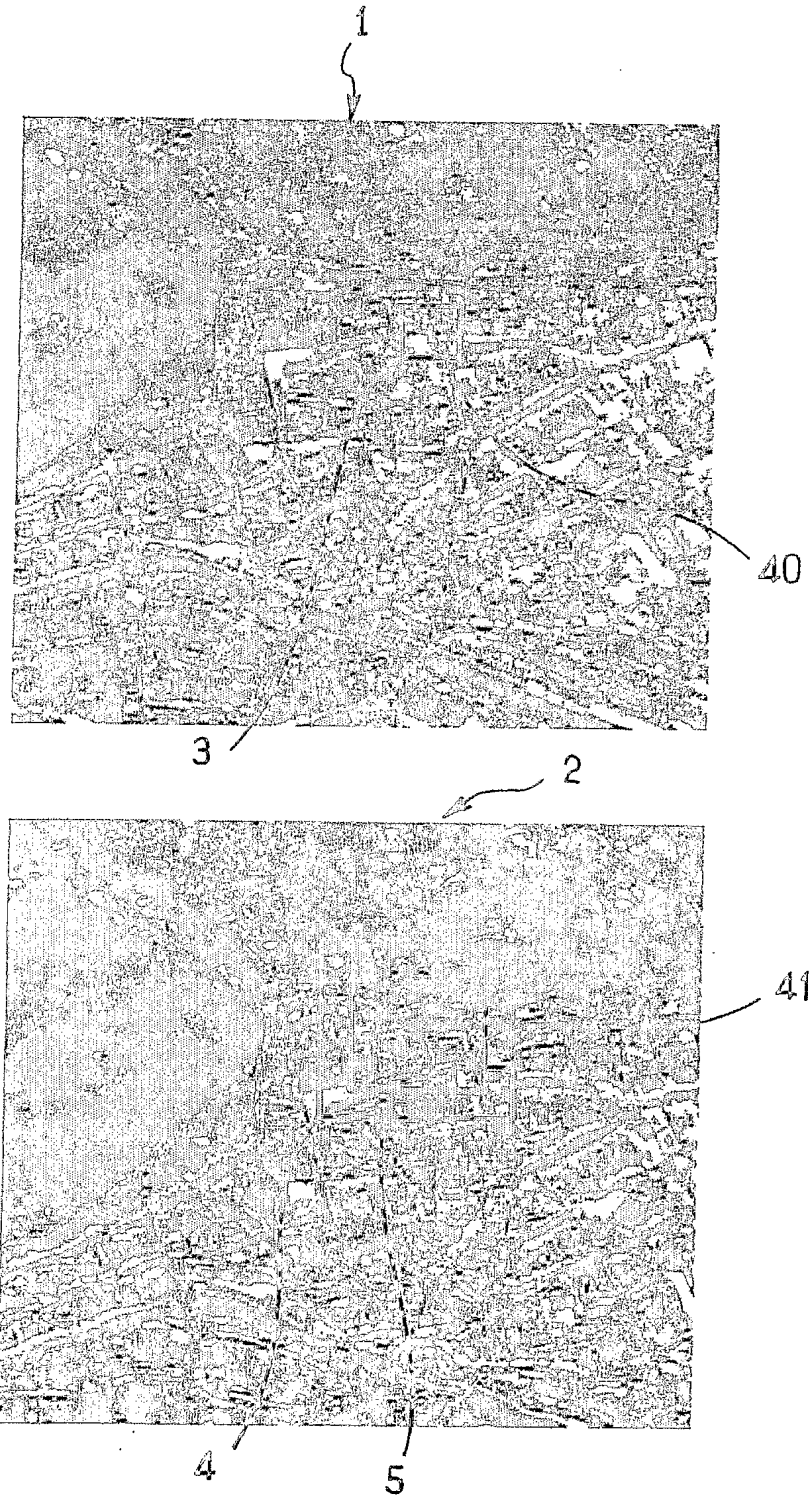


FIG. 1

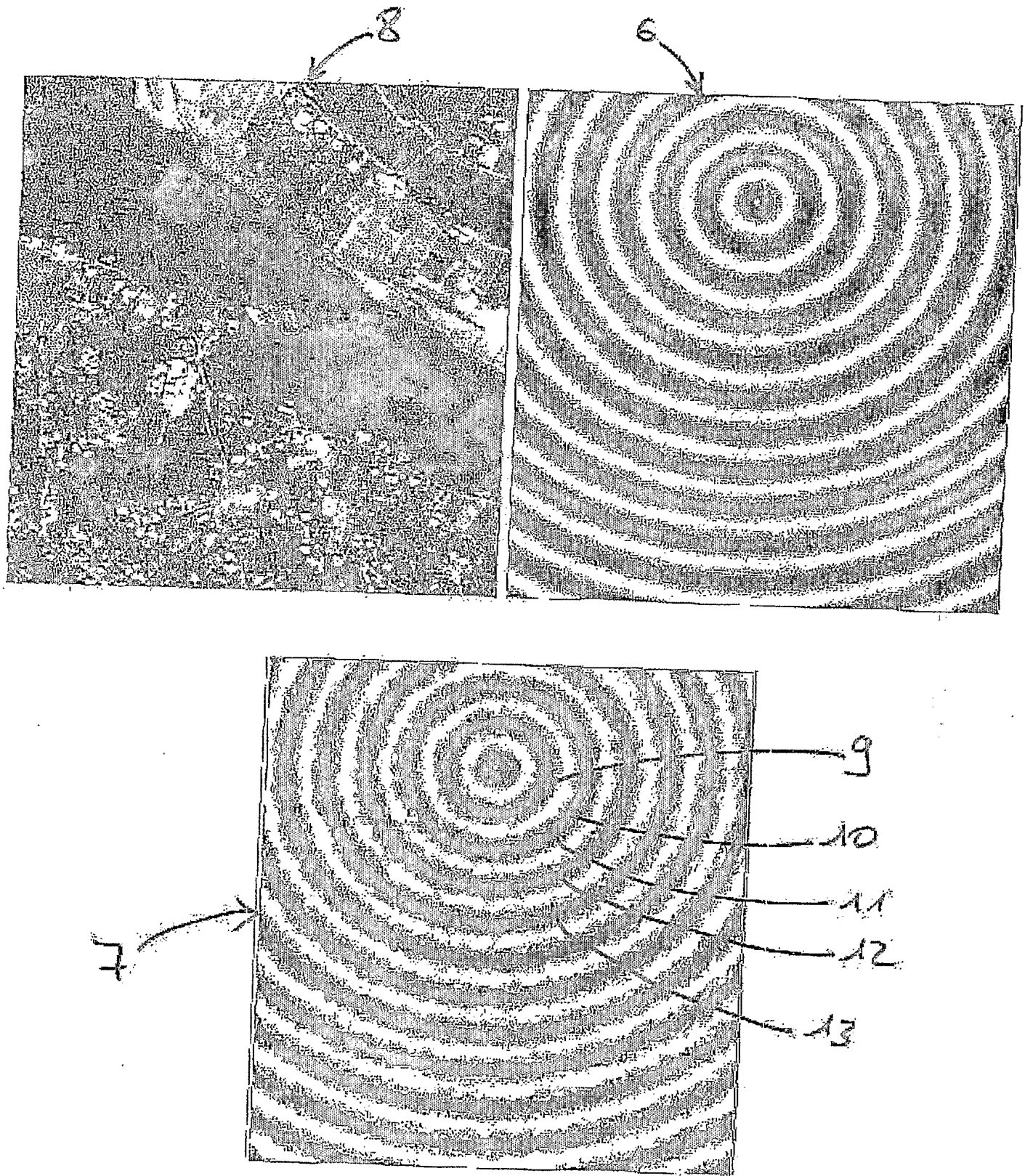


FIGURE 2

2 / 9

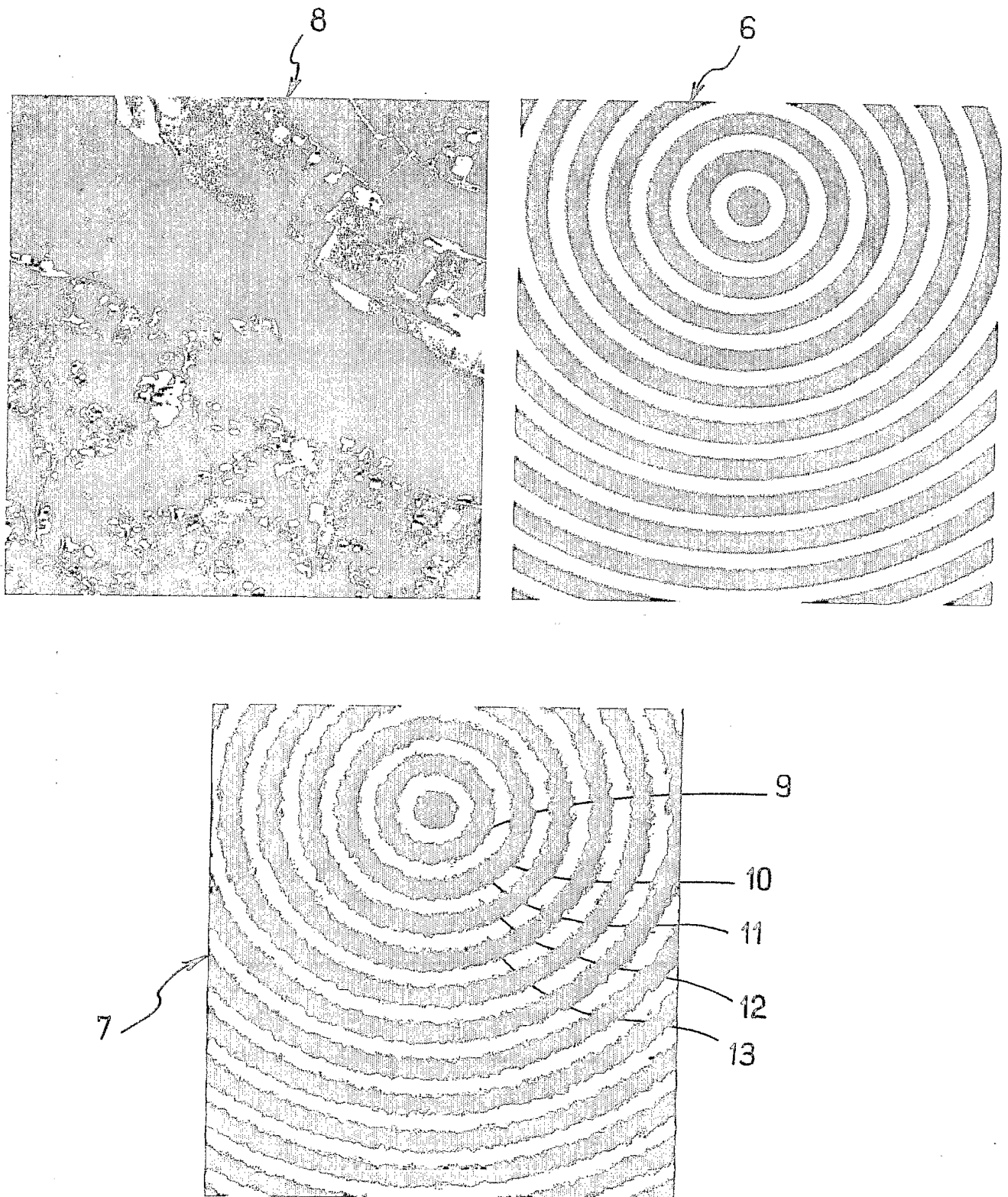


FIG. 2

3/9

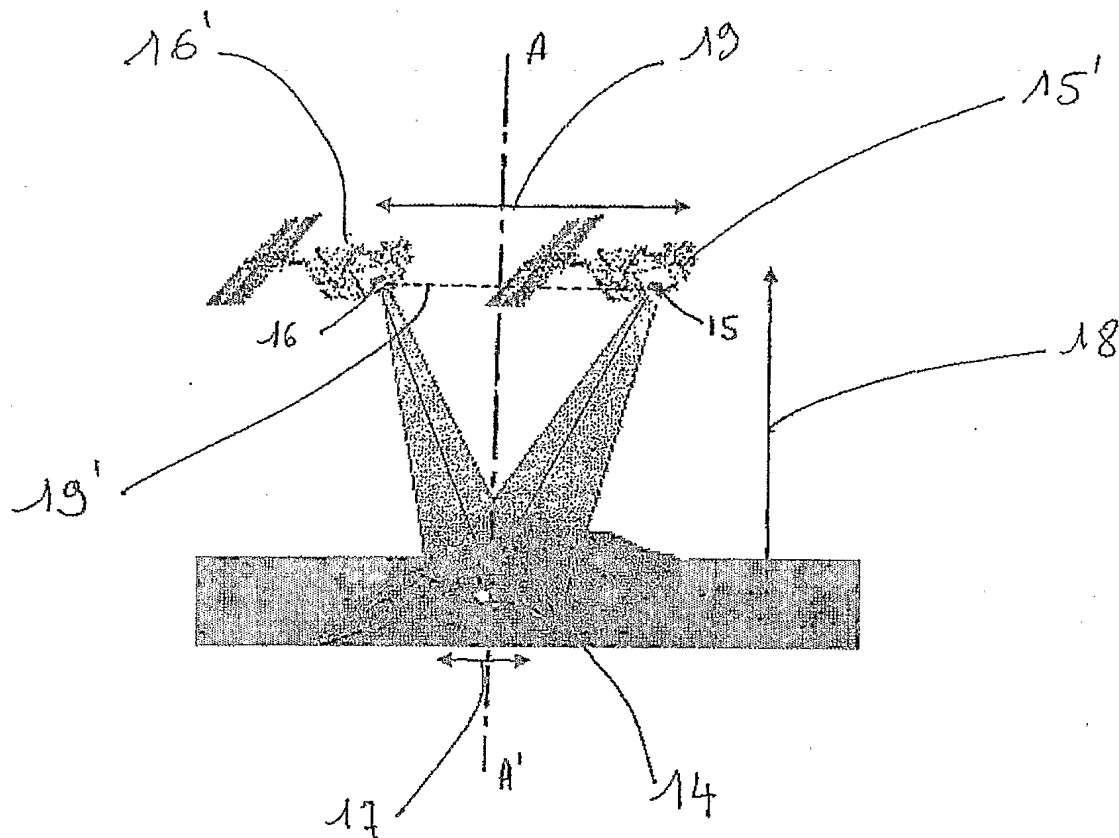


FIGURE 3



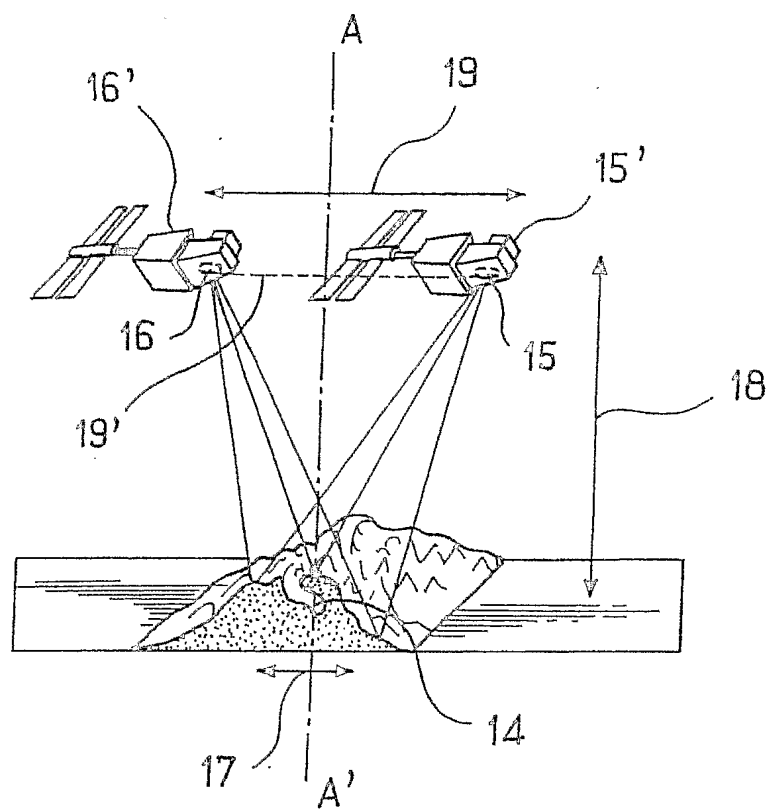


FIG. 3

4/9

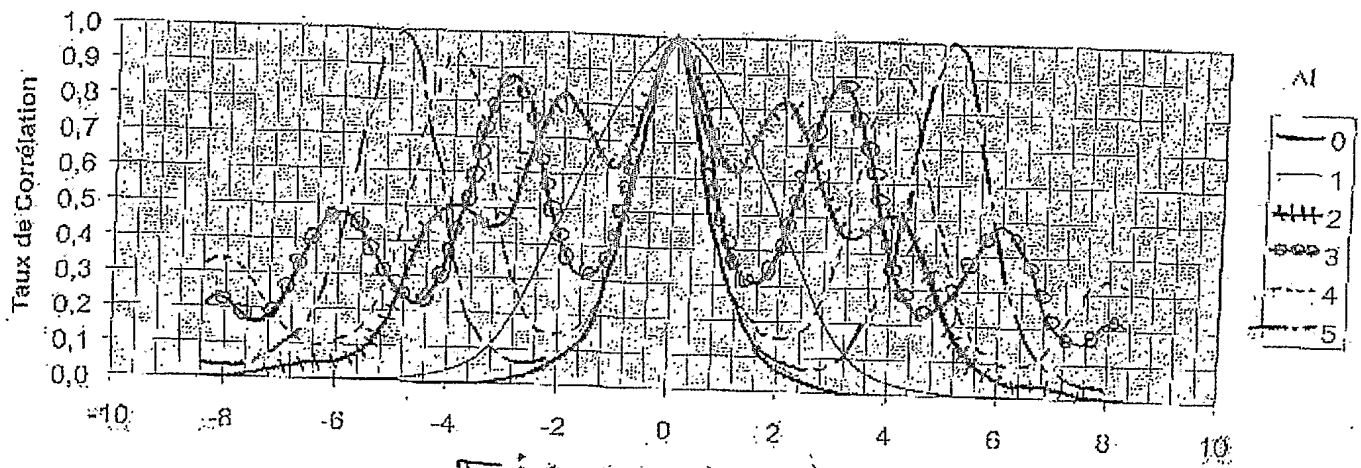
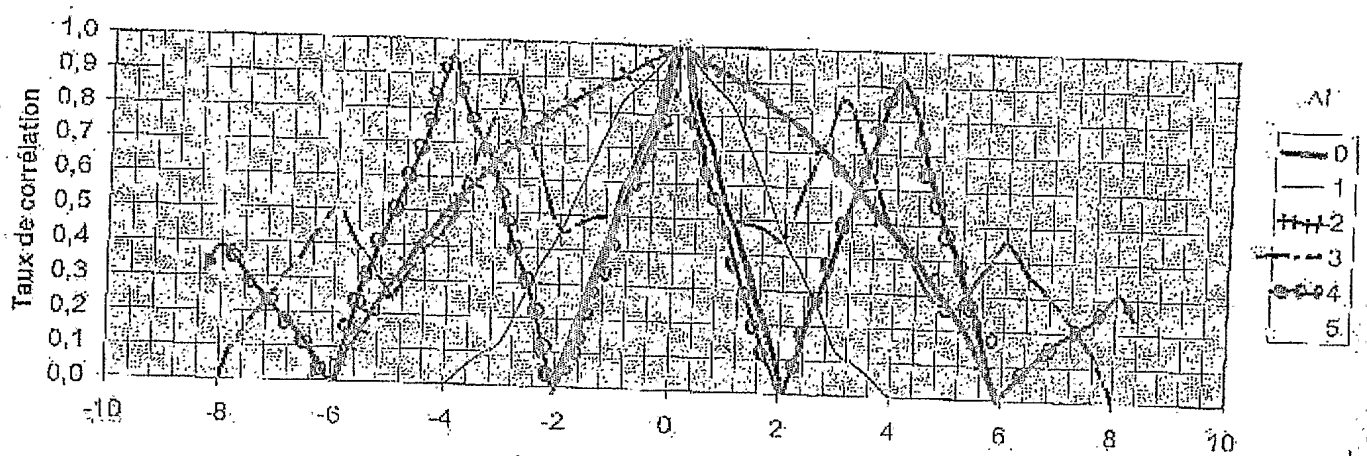


FIGURE 4



FIGURES

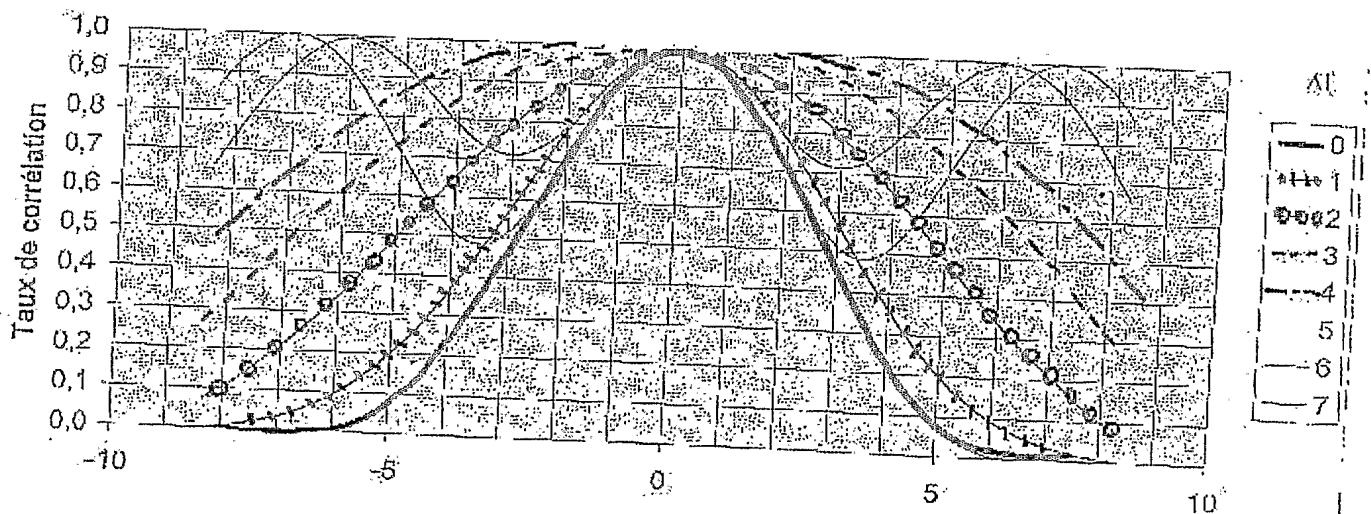


FIGURE 6

4 / 9

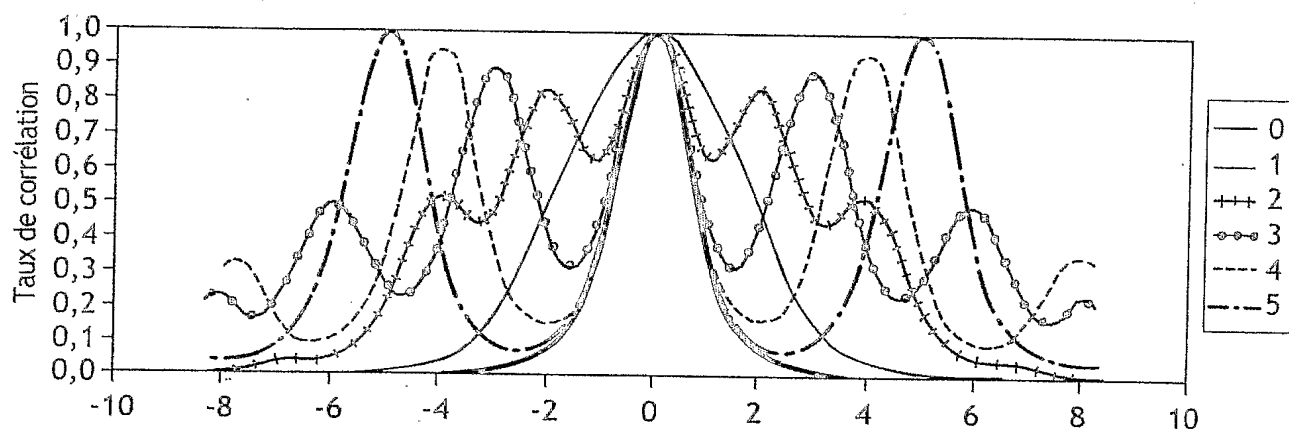


FIG. 4

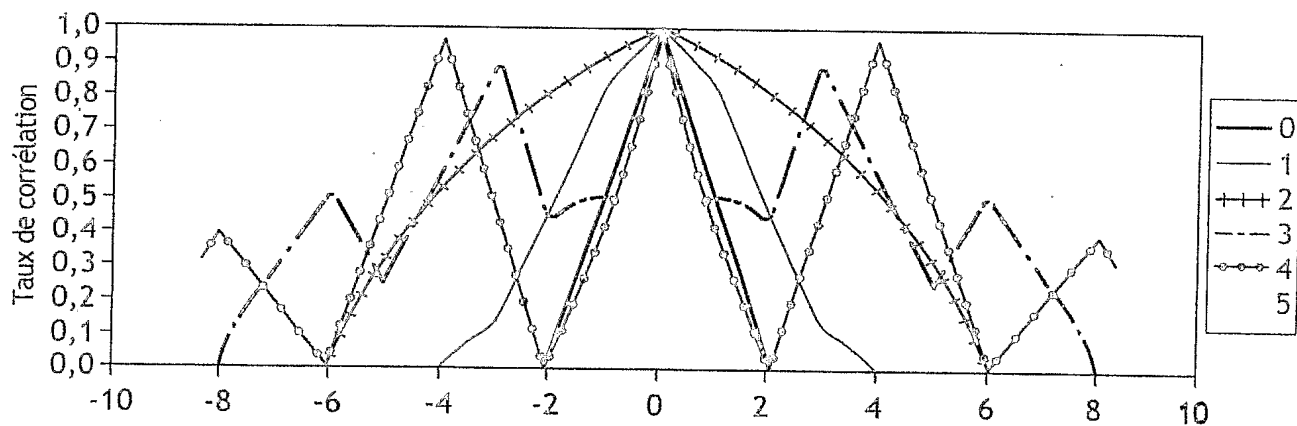


FIG. 5

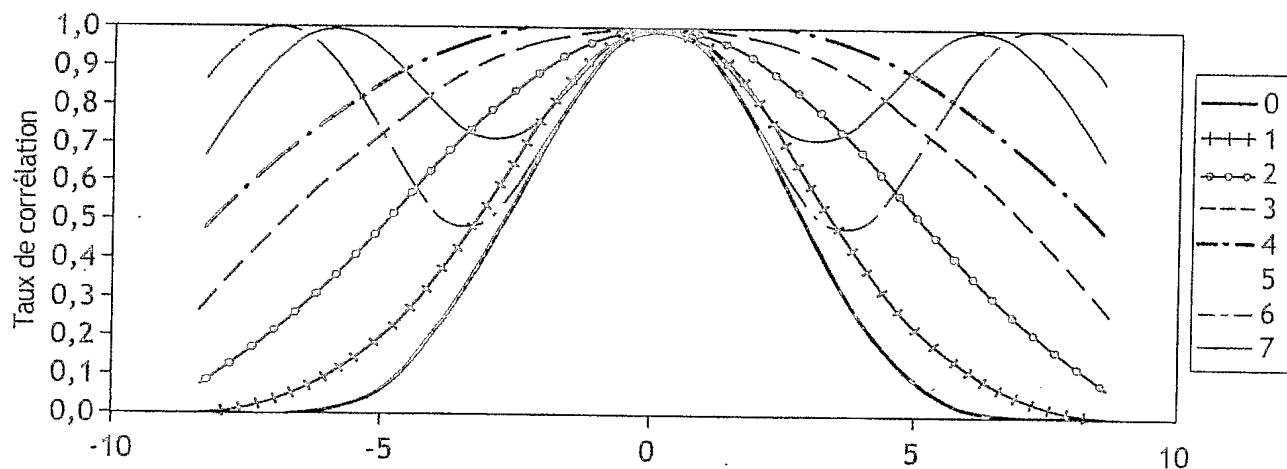


FIG. 6

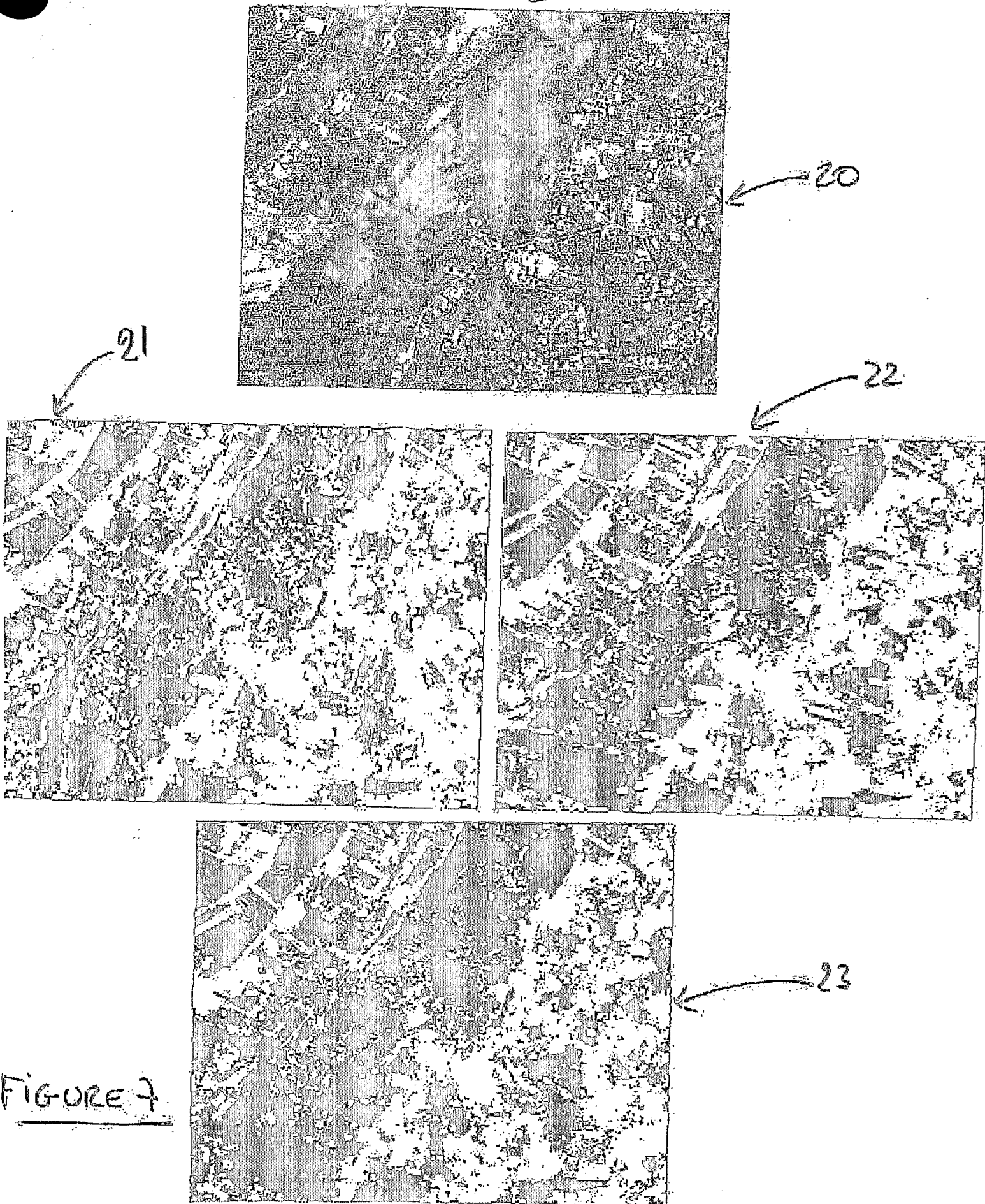


FIGURE 7

5 / 9

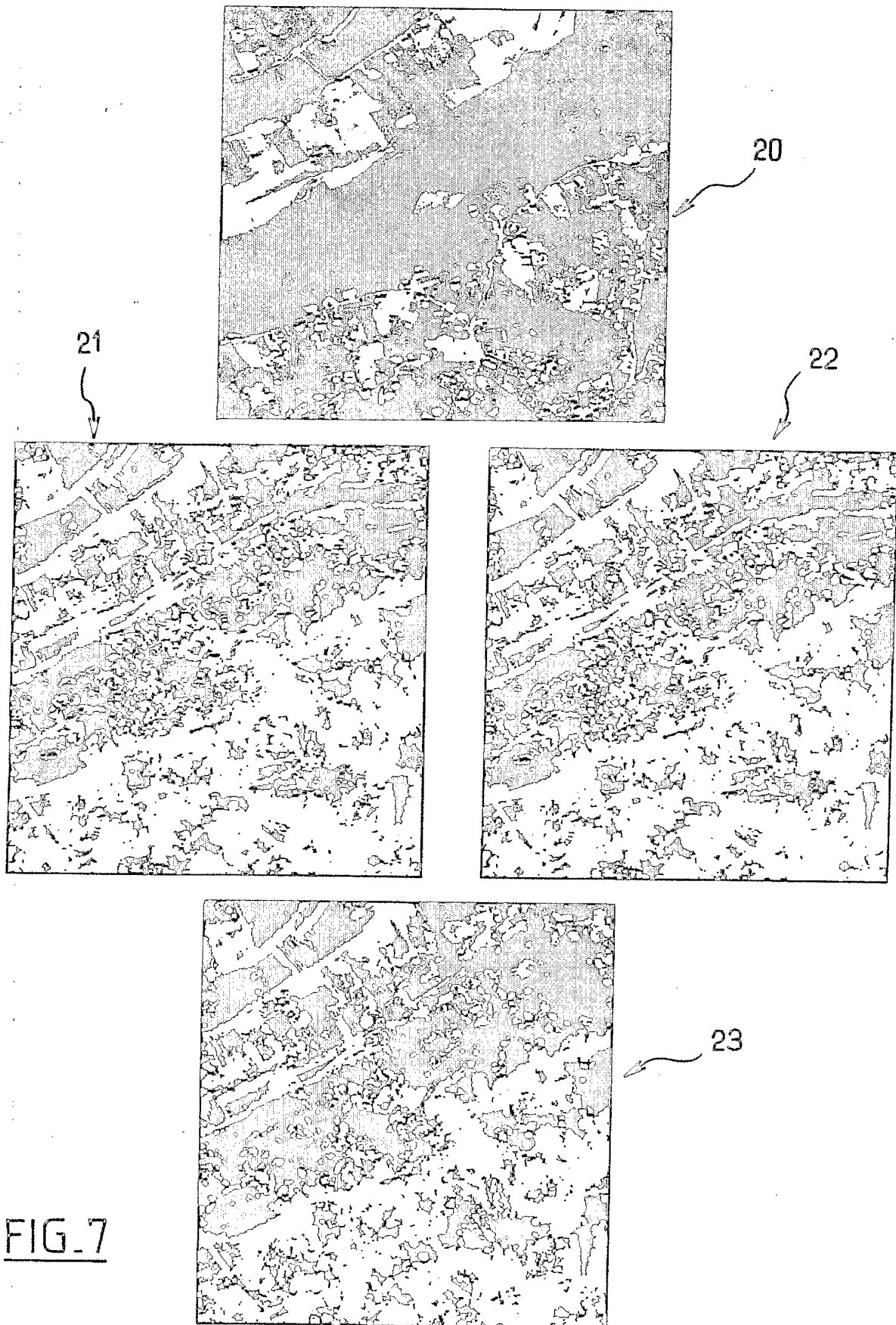


FIG. 7

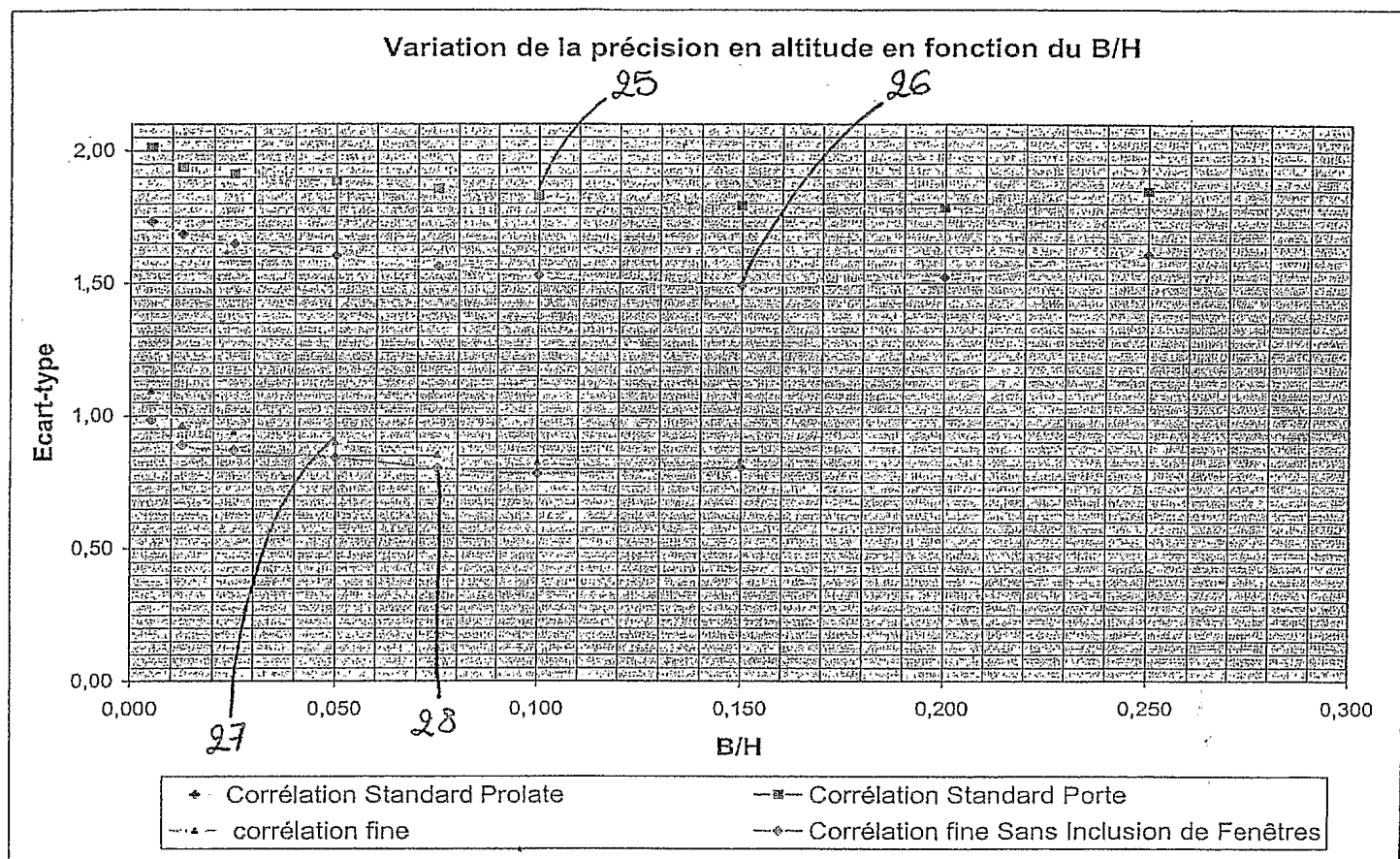


FIGURE 8

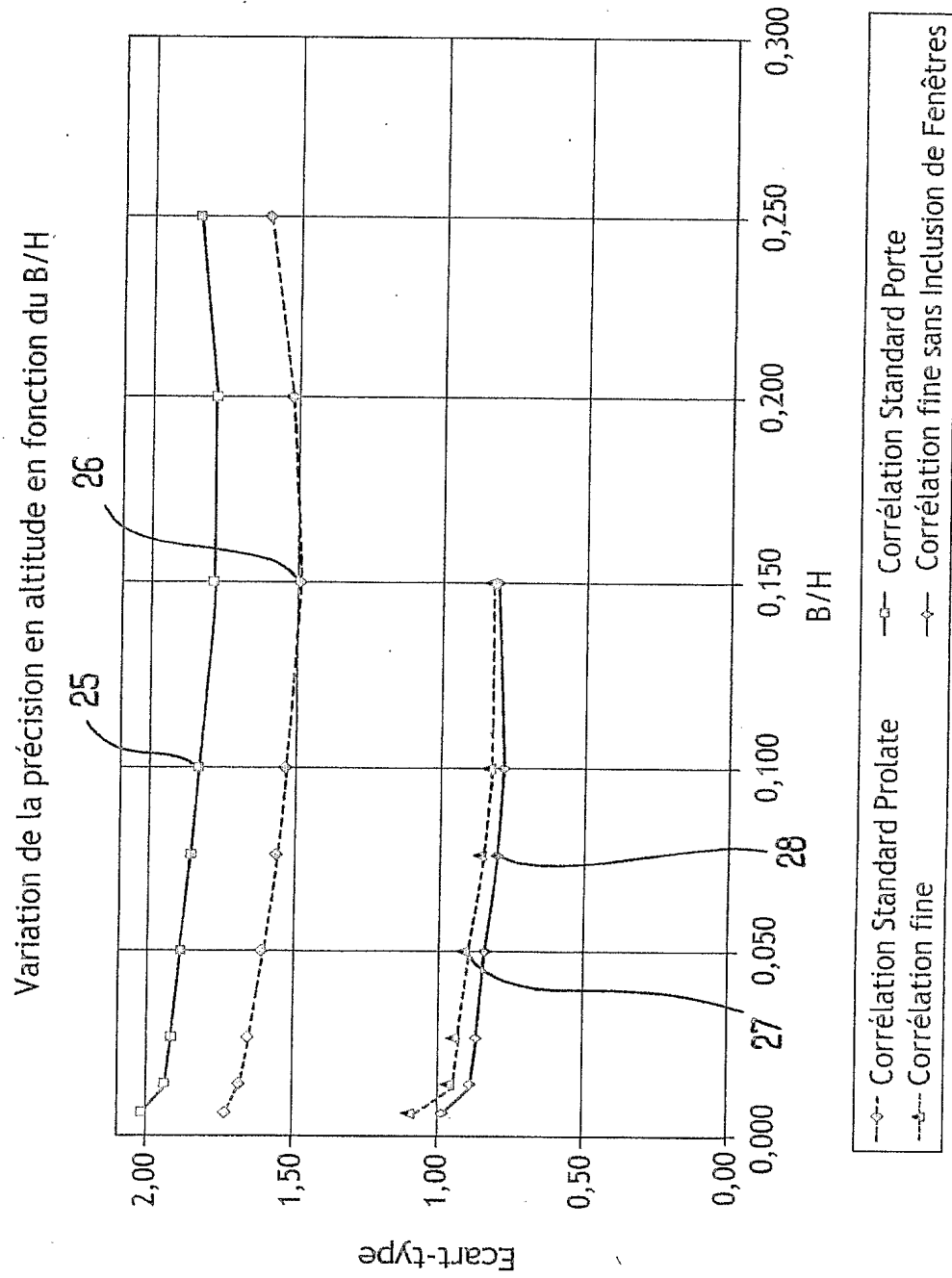
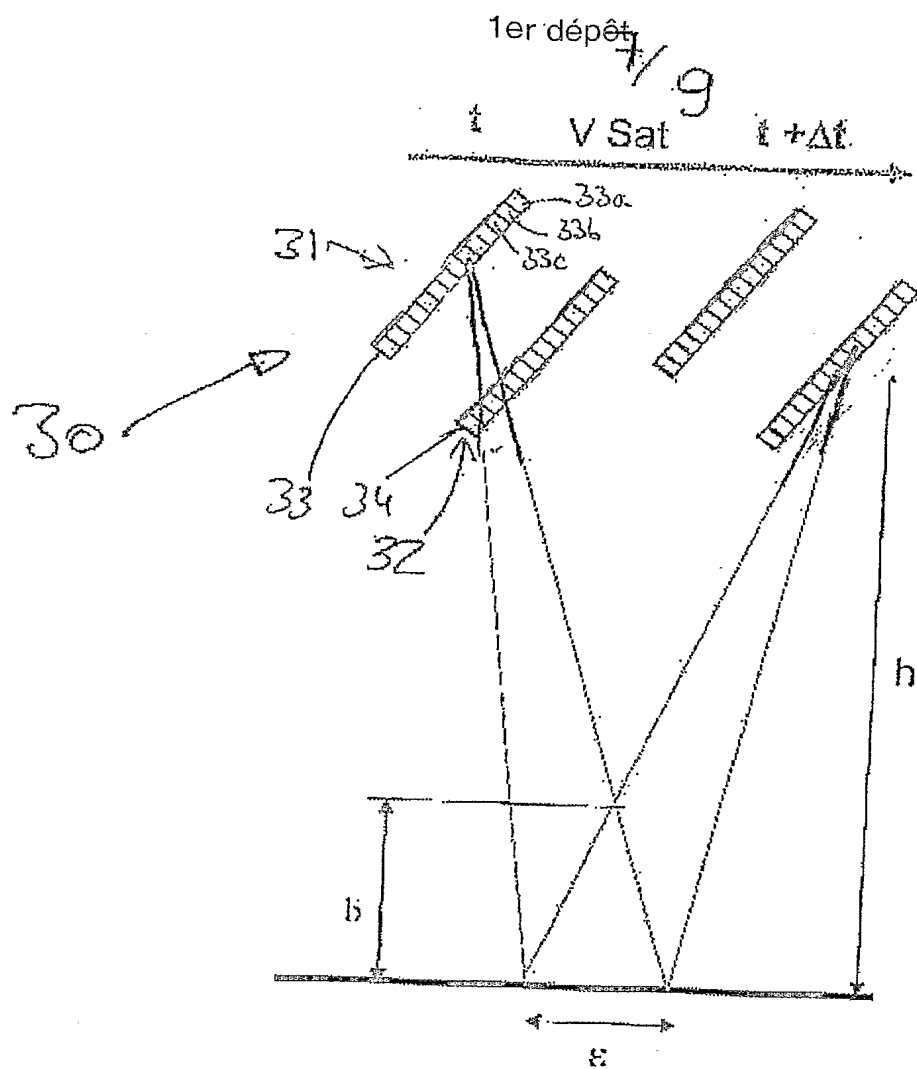


FIG. 8



FIGURES



7 / 9

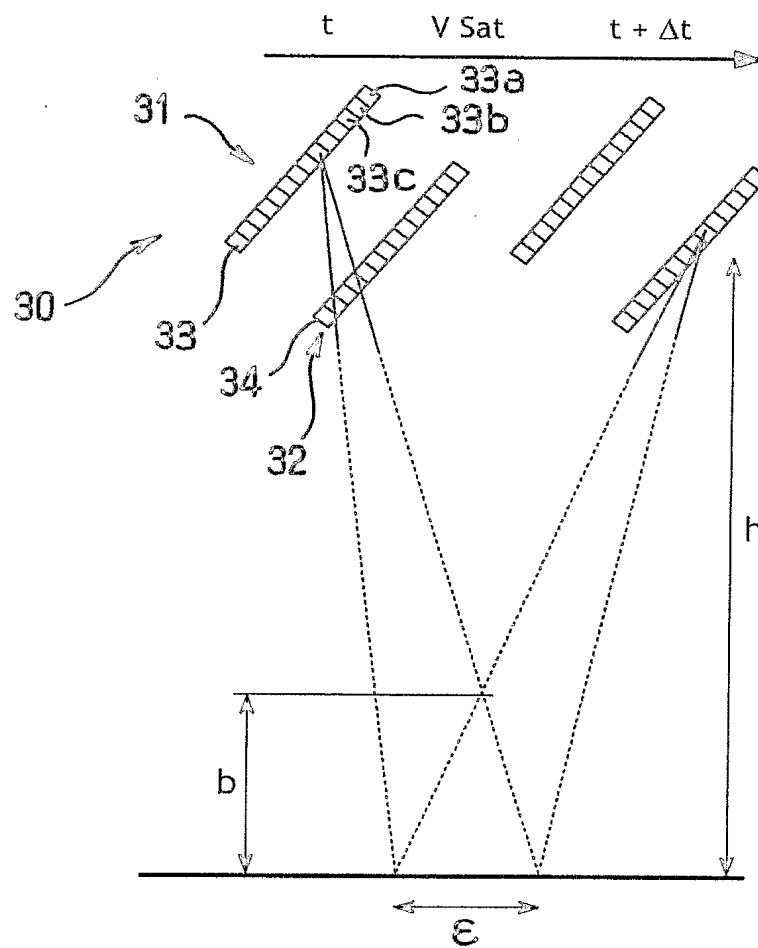


FIG.9

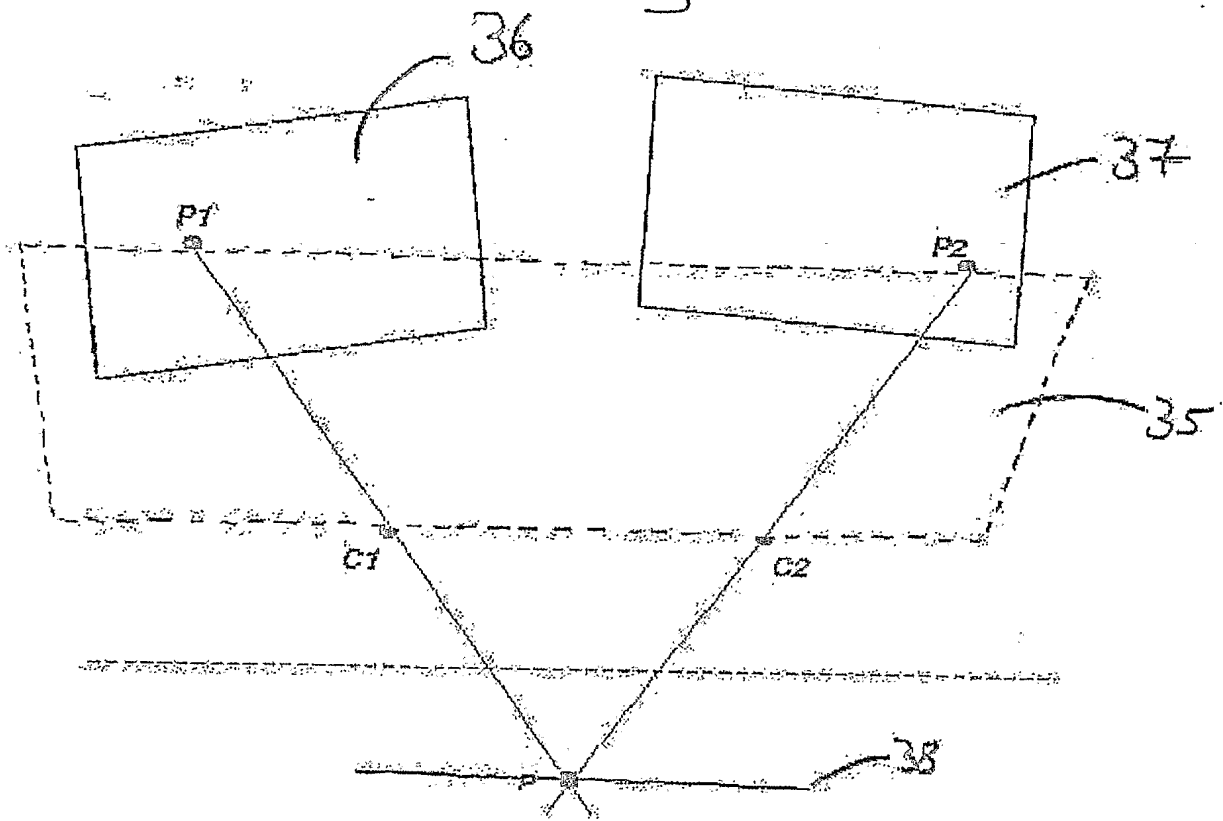
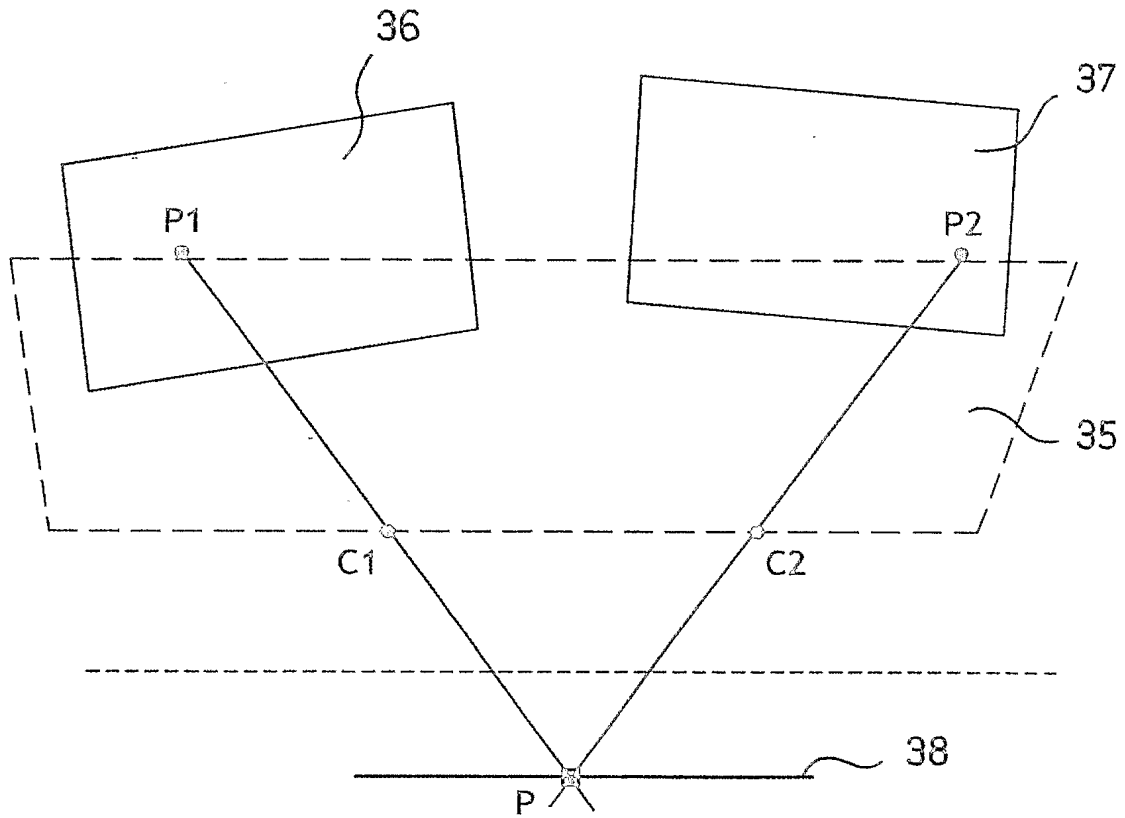


FIGURE 10



FIG\_10

9/9

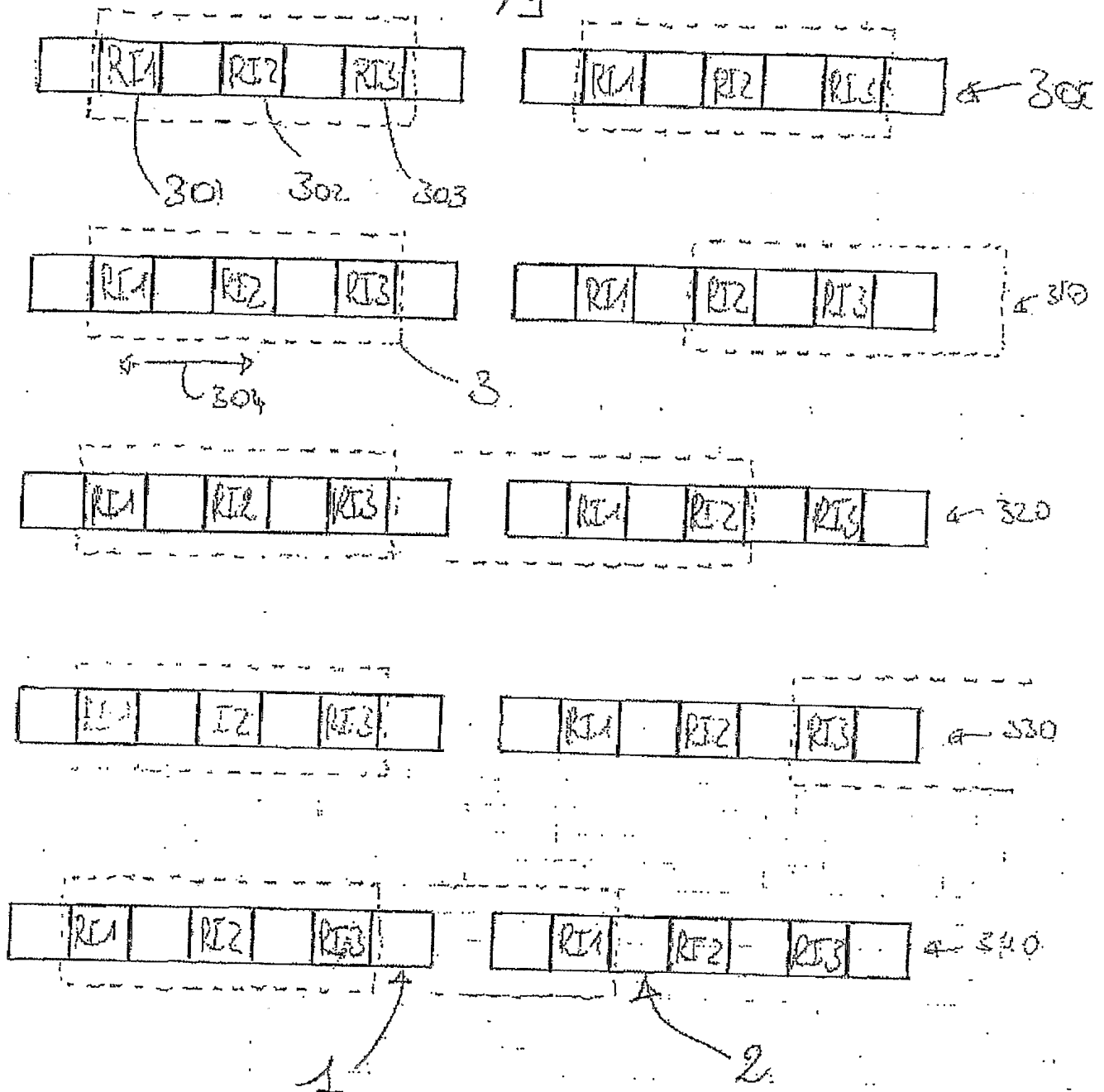


FIGURE 1

9 / 9

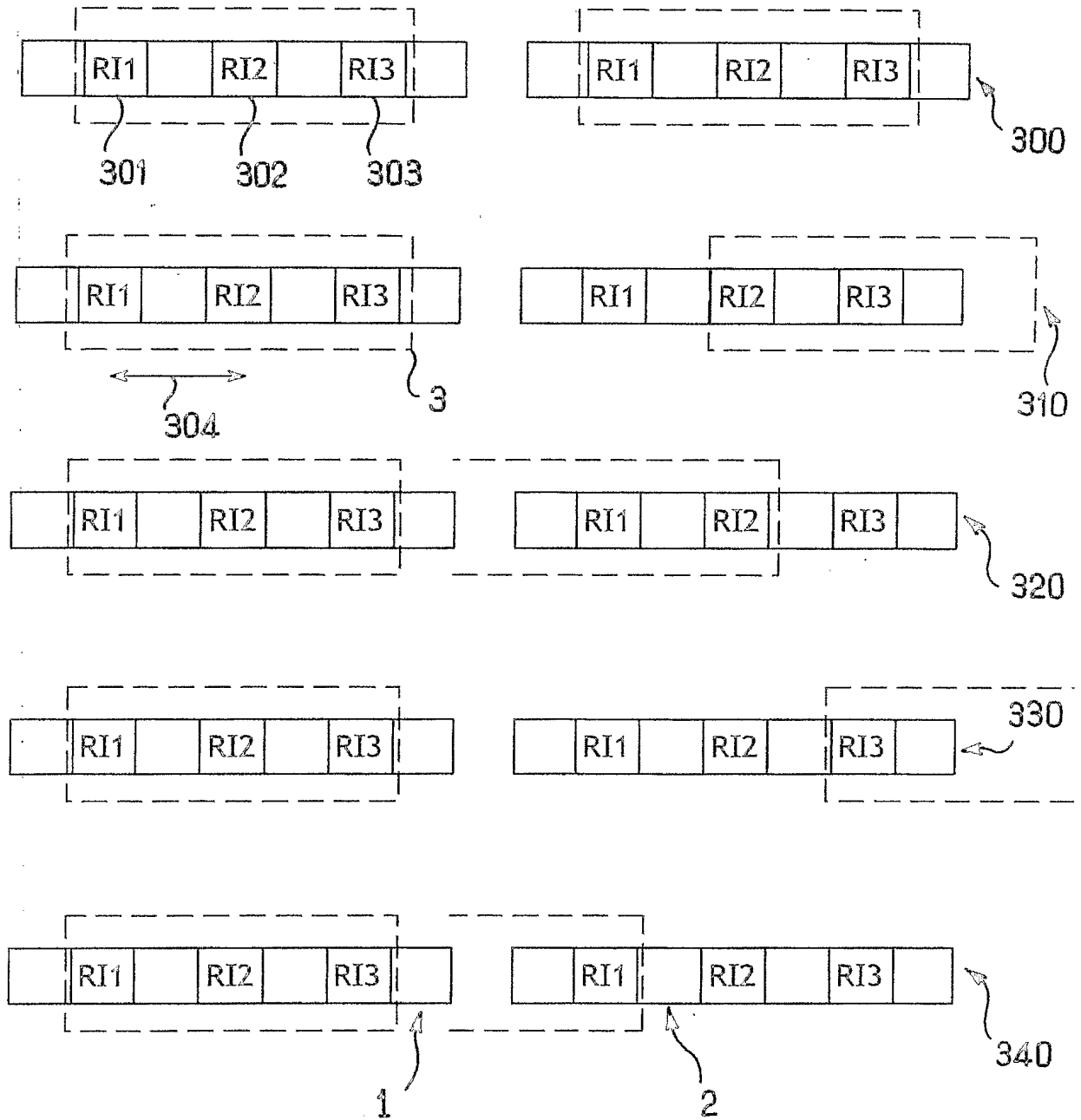


FIG. 11

reçue le 21/04/04

# BREVET D'INVENTION

## CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11235\*03

26 bis, rue de Saint Pétersbourg - 75800 Paris Cedex 08

Pour vous informer : INPI DIRECT

INPI Direct 0 825 83 85 87  
0,15 € TTC/min

Télécopie : 33 (0)1 53 04 52 65

**DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S)** Page N° 1. . 1. . .

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 210103

<b>Vos références pour ce dossier (facultatif)</b>		
<b>N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL</b>		0463163
<b>TITRE DE L'INVENTION</b> (200 caractères ou espaces maximum) APPARIEMENT FIN D'IMAGES STEREOSCOPIQUES ET INSTRUMENT DEDIE AVEC UN FAIBLE COEFFICIENT STEREOSCOPIQUE.		
<b>LE(S) DEMANDEUR(S) :</b> CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES : 2, place Maurice Quentin 75001 PARIS FRANCE -		
<b>DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :</b>		
<b>1</b>	Nom	ROUGE Bernard
	Prénoms	
Adresse	Rue	19, rue Bonnat 31400 TOULOUSE FRANCE
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
<b>2</b>	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
<b>3</b>	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
<b>DATE ET SIGNATURE(S)</b> <b>DU (DES) DEMANDEUR(S)</b> <b>OU DU MANDATAIRE</b> (Nom et qualité du signataire)		
26/03/04		
[Signature]		

